

# IP と NDN の混在環境における AS 間経路制御

田中 晃平<sup>†</sup> 上山 憲昭<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 立命館大学 大学院 情報理工学研究科

〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

<sup>††</sup> 立命館大学 情報理工学部

〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: <sup>†</sup>is0565kf@ed.ritsumei.ac.jp, <sup>††</sup>kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし IP アドレスではなく、コンテンツの名称に基づきパケットを転送することにより効率的なデータ配信を実現する情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) が次世代のネットワークとして研究されている。ICN のアーキテクチャの一つとして、特に研究が盛んに行われているものに NDN (named data networking) がある。NDN が実世界で実用化される際、NDN の普及過程においては、IP の AS (autonomous system) と NDN の AS との混在環境が生じるため、どのようにパケットを転送するかが課題となる。このような環境で通信を実現するためには、IP パケットと NDN パケットの相互変換機能と NDN-AS で公開されているコンテンツに対して名前解決を可能とするための手法が必要になる。この課題に対して、異種の AS 間の境界となるリンクにパケット変換機能を有する Gateway (GW) を設置し、この GW にコンテンツの要求ホスト (Consumer) や配信ホスト (Publisher) の IP アドレス、要求しているコンテンツの名称といった情報を集約させることによって、IP と NDN の混在環境でのパケット転送法を実現する手法がある。しかし、この手法では GW の処理がオーバーヘッドとなり、通信時の遅延を増加させる問題がある。そこで本稿ではより効率的なデータ配信の実現のため、IP と NDN が混在している環境における各 AS の採用プロトコルを考慮した AS 間経路制御法を提案する。

キーワード ICN, NDN, レイテンシ, AS 間経路制御, AS PATH Prepending

## Inter AS Path Control in IP/NDN Mixed Environment

Kohei TANAKA<sup>†</sup> and Noriaki KAMIYAMA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University  
2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570

<sup>††</sup> College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University  
2-150, Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570

E-mail: <sup>†</sup>is0565kf@ed.ritsumei.ac.jp, <sup>††</sup>kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

**Abstract** Information-Centric Networking (ICN) is being researched as a next-generation network architecture that achieves efficient data distribution by forwarding packets based on content names rather than IP addresses. Named Data Networking (NDN) is one of the most actively studied ICN architectures. During the real-world deployment and transition phase of NDN, a mixed environment of IP Autonomous Systems (ASes) and NDN ASes will emerge, making packet forwarding a significant challenge. To enable communication in such environments, functions for mutual conversion between IP and NDN packets and mechanisms for name resolution of content hosted within NDN ASes are required. One approach to this challenge involves deploying Gateways (GW) with packet translation capabilities at the boundary links between heterogeneous ASes. These GWs aggregate information, such as the IP addresses of requesting hosts (Consumers) and providing hosts (Publishers) along with the requested content names, to enable packet forwarding across the mixed IP/NDN environment. However, this method risks increasing communication latency, as the processing load on the GWs creates significant overhead. Therefore, to achieve more efficient data distribution, this paper proposes an inter AS Path Control method that accounts for the specific protocols adopted by each AS in a coexisting IP and NDN environment.

**Key words** ICN, NDN, latency, Inter AS Path Control, AS PATH Prepending

### 1. はじめに

従来のインターネットで利用されている TCP/IP では、通信開始時に DNS (domain name system) で通信相手の名前解決を行い、IP アドレスを取得することでパケットの送受信をする。しかし、現在のインターネットの利用目的は Web や動画

といったデジタルコンテンツの配信が主目的であり、TCP/IP が開発された当時のものとは大きく異なっている。また、現在普及の進む IoT (internet of things) サービスでは、ユーザがキーワードや探索条件などの具体性を持たないコンテンツ名でデータを要求することが想定され、DNS での名前解決が困難になる。

このような近年の変化をうけて、コンテンツの名称に基づきパケットを転送することにより効率的なデータ配信を実現する ICN が、次世代のネットワークアーキテクチャとして提案された [3] [4]。ICN は通信開始時に名前解決を行わず、コンテンツの名称で Interest を転送し、Publisher から配信されるコンテンツをルータでキャッシュする。ICN では Interest のヘッダに記載された情報から、ルータが要求コンテンツ名を把握可能である。そのため、Interest が転送される経路上のルータに、要求しているコンテンツのキャッシュデータが存在している場合、ルータからキャッシュを用いて Data パケットが送信される。これにより、Publisher まで Interest を送信する必要がなくなり、効率的にデータが配信される。ICN を実現するためのネットワークアーキテクチャの代表的なものが NDN [5] であり、本稿でも ICN のアーキテクチャとして NDN を想定する。

NDN の実環境での実装を想定すると、NDN は各 AS を運営するネットワーク事業者によって導入の判断が行われる。したがって既存の IP のネットワークが一斉に NDN へと置き換わるという環境は非現実的であり、IP-AS と NDN-AS が混在した環境が構築されると想定される。このような環境では IP と NDN という異種のネットワーク間でのパケット転送法が必要になる。IP アドレスに基づいてパケットを転送する IP と、コンテンツの名称に基づいてパケットを転送する NDN との間での通信を実現するためには、パケットのヘッダを書き換えることにより、IP パケットと NDN パケットの相互変換を行う必要がある。

この課題に対し、先行研究で文献 [1] によって提案されたパケット変換機能を有した GW (DINT-GW: Dual-channel IPto-NDN translation gateway) をもとにし、パケットヘッダを操作するために必要な情報を GW に集約させ、IP と NDN の混在環境でのパケット転送法を実現する手法を提案した [6]。文献 [1] では DINT-GW は NRS (name resolution service) の利用を前提としていた。NRS は IP アドレスとコンテンツ名の対応を管理するサーバであるが、この NRS での IP アドレスとコンテンツ名の対応付けの方法については未解決であった。そこで、文献 [6] の手法は、NRS のような外部システムに依存しないパケット転送法となっている。

しかし、この文献 [6] の手法では GW の処理がオーバーヘッドとなり、IP のみの環境と比較して通信時の遅延を増加させる可能性を持っている。したがって本稿では、IP と NDN の混在環境において文献 [6] のパケット転送法を用いるという前提のもと、より効率的なデータ配信の実現のため AS PATH Prepending [13] [14] を利用した、各 AS の採用プロトコルを考慮した AS 間経路制御法を提案する。

## 2. 関連研究

### 2.1 NDN

NDN は ICN の初期のアーキテクチャである CCN (content centric networking) [3] を拡張したものである。NDN ではルータの FIB (forwarding information base) と PIT (pending interest table) という二つのテーブルによってパケットの経路が決定する。FIB は、次に Interest を転送すべき Next Hop(NH) を調べるためのテーブルであり、これを参照することで Interest の転送経路を決定する。Publisher はコンテンツをネットワーク上に公開した際、そのコンテンツの名称を広告する。コンテンツ名の広告は、広告を受けたルータが隣接ルータへと再広告することでネットワーク全体に広がり、FIB は、隣接ルータからコンテンツ名の広告を受けたときに更新される。この処理によって、Interest が Publisher に向けて転送されるように FIB が設定される。

また、PIT は Interest の転送元である、隣接ルータを記録するテーブルである。Interest の応答として Data パケットを返送する際、PIT に記録された Interest の転送元へと Data パケットを転送していくことで、Interest が転送された経路を遡るように Data パケットの転送経路が決定する。

### 2.2 IP と ICN の統合ネットワーク

本稿ではパケット変換 GW を用いて、IP と ICN が混在するネットワークを構築するが、他の IP と ICN が共存するようなネットワークの手法として、既存の IP ネットワークと ICN をオーバーレイの関係として展開するもの [8] [9] や、Giovanna Carofiglio らによって提案された hICN [7] を利用するものなど多様なアプローチが存在する。特にオーバーレイ方式は広く研究されているが、IP 上で ICN を提供するために新たなレイヤを準備する必要があることや、パケットカプセル化などの処理オーバーヘッドが生じるといった問題がある。

一方、本稿で扱っているパケット変換 GW を用いる手法の利点は、IP から NDN に移行する際に必要となるネットワーク機器のアップグレードコストが小さいこと [2] や、純粋な NDN が従来の IP ネットワークと共存するために、既存ネットワークに追加の変更を加える必要がない点にある。

## 3. 提案手法

本節では、提案する AS 間経路制御法について述べる。3.1 節で AS PATH Prepending と呼ばれるトラフィック制御手法について述べ、3.2 節で本手法を用いた、本稿で提案する AS 間経路制御法について詳細を述べる。

### 3.1 AS PATH Prepending

AS を運営する各ネットワーク事業者は経済的な要因やネットワーク運用上の要件に応じ、トラフィックの制御を実施する場合がある。BGP (border gateway protocol) を用いたトラフィックの制御には、選択的またはより詳細なプレフィックス広告 [15]、BGP コミュニティ [16] [17]、Multi Exit Discriminator [18]、セグメントルーティング [19] を用いるものなどがあるが、本稿で扱う AS PATH Prepending はこれらの中でもシンプルで扱いやすい手法であり、AS 間トラフィック制御の手法として代表的なものの一つである [12]。

AS PATH Prepending は AS が他の AS に対して経路広告を伝播させる際に、その経路広告に自身の AS 番号を  $n$  回余分に重複させて BGP 経路情報を伝播させることで、他 AS が受け取る AS パス長の情報を意図的に  $n$  ホップ分だけ増加させるトラフィック制御手法である。

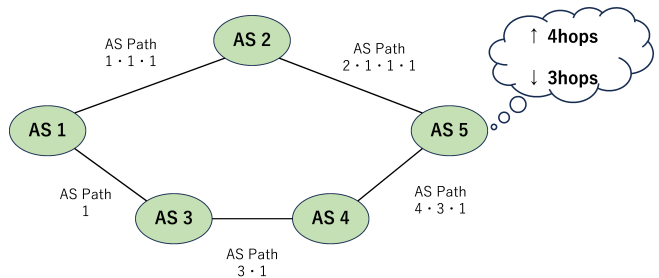


図 1: Execution example of AS PATH Prepending

図 1 は AS PATH Prepending の実行例と、AS PATH Prepending が実際にどのように働くかを示した図である。ここでは、図 1 の示す通り 5 つの AS から構成される簡単なトポロジを例にする。このトポロジでは AS 5 が AS 1 に対してパケットを転送する場合に、パケット転送経路の候補として経

由する AS の数が異なる二つの経路がある。しかし、AS 1 が経営判断などの理由により AS 2 から流入するトラフィック量を抑制しようとする場合、AS 2 に対して広告する BGP 経路情報に AS PATH Prepending を実行する。AS 2 に対して二回 AS 番号を重複させて BGP 経路情報を伝播させると、最終的に AS 5 に対して伝わる AS 2 を経由する経路の AS パス長は「 $2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$ 」で 4 ホップの経路として AS 5 に経路情報が伝わる。一方、AS 3 を経由する経路に対しては AS PATH Prepending が行われた経路情報が広告されていない場合、最終的に AS 5 に対して伝わる AS 3 を経由する経路の AS パス長は「 $4 \cdot 3 \cdot 1$ 」で 3 ホップの経路として AS 5 に経路情報が伝わる。

図 1 の例の場合、AS 5 は AS 2 を経由する経路の方が AS パス長が長いという情報を広告されているため、実際に経由する AS 数は AS 2 を経由する経路の方が少ないにも関わらず、AS 1 へのパケット転送経路として AS 3 を経由する側の経路を選択する。このように AS PATH Prepending を活用することで、AS 1 は本来ならば AS 2 から転送されてくる、AS 5 が送信するパケットを AS 3 側の経路で受信することが可能となる。

AS PATH Prepending による経路制御の原理は上記の通りだが、その制御の強さは AS 番号を余分に重複させる回数  $n$  によって調整される。重複回数  $n$  がどの程度の影響を持つかは AS それぞれの他 AS との接続関係といったネットワーク状況によって変動するが、過去の観測結果では AS PATH Prepending の利用例の多くで  $n$  は 1 から 3 といった小さい値になっている。一方で、10 回以上の  $n$  で AS PATH Prepending が行われているような例は全体の 1% 程である [10]。

### 3.2 経路制御法

一般的に使われている BGP のベストパス選択アルゴリズムの一つである Cisco 系のアルゴリズム [24] では経路選択基準は各 AS が独自に定めるポリシーが最優先であり、次いで優先される基準が AS PATH の長さとしてされている。本稿での AS 間経路選択では、AS 独自のポリシーは制御不可能であるため考慮せず、全 AS は AS PATH の長さに応じて利用する経路を決定するものとする。

ここで、IP と NDN の混在環境では IP のみの既存ネットワークと比較して、NDN の特性であるキャッシュを用いた効率的なコンテンツ配信機能と、パケット変換 GW のパケットロスによるオーバーヘッドというパケット転送遅延に大きく関わる要素が二つ新たに加わる。したがって、Interest 転送経路の AS で採用しているプロトコルや、経由するパケット変換 GW の数を考慮した経路制御を実施することで単純に最小ホップ数となる経路 (最短経路) でパケット転送するよりも低遅延となる可能性がある。

そこで、本稿では各 AS がそれぞれ、隣接 AS が IP を採用している AS であるか NDN を採用している AS であるかによって AS PATH Prepending を行い、ネットワーク全体で採用プロトコルを考慮した AS 間経路制御を実施することを提案する。NDN 実装を想定した BGP の拡張案である、N-BGP [21] ではセッションを張る BGP スピーカ同士が OPEN メッセージにより、互いに相手スピーカが NDN に対応しているかどうかを確認しあう。この OPEN メッセージの処理によって各 AS は隣接している AS で採用されているプロトコルが IP であるか NDN であるかを把握することが可能となる。これを利用し、各 AS は隣接する各 AS に対して採用プロトコルを考慮した AS PATH Prepending を実施する。

また、最小ホップ数経路より低遅延な通信を実現する可能性をもつ経路制御ポリシーとして、NDN-AS 高利用率経路の利用とパケット変換 GW 低利用率経路の利用を目指す二種の制御法を提案する。NDN-AS 高利用率経路では、経路広告を実

施する AS は OPEN メッセージで得た隣接 AS の採用プロトコル情報から、IP を採用している AS に対しては AS PATH Prepending を実施した経路を広告する。IP-AS を経由する経路の選択率が減少するため、経由する AS として NDN-AS の利用率が高まる。したがって、Interest 転送途中で NDN ルータからのコンテンツ配信が行われる確率が高まり、結果的に最小ホップ経路を利用する場合よりもパケット転送遅延がされる可能性がある。また、ここで AS 間経路広告時に AS 番号を重複させる回数  $n$  は文献 [10] で一般的な回数とされていた 2 とする。

パケット変換 GW 低利用率経路では、経路を広告する AS は OPEN メッセージで得た隣接 AS の採用プロトコル情報から、経路広告を実施する AS 自身とは異なるプロトコルを採用している AS に対して AS PATH Prepending を実施した経路を広告する。同一プロトコルの AS が連続する経路の選択率が高まるため、パケット変換 GW の利用によって生じるオーバーヘッド量が削減され、結果的に最小ホップ経路を利用する場合よりもパケット転送遅延が低減する可能性をもつ。また、ここで AS 間経路広告時に AS 番号を重複させる回数  $n$  は NDN-AS 高利用率経路の場合と同様に 2 とする。

## 4. 性能評価

本稿では、提案する経路制御法の影響を計算機シミュレーションにより評価する。シミュレーションでは実際の AS 間トポロジデータセット [23] をもとに、文献 [20] で使われた方法と同様のサンプリングにより作成された仮想トポロジを用いた。

この AS トポロジは、多数の接続経路を持ちスーパーハブノードとして機能する少数の高次数 AS と、接続経路数が少ない多数の低次数 AS から構成される階層構造を有している。NDN はネットワーク事業者にとっては低次数 AS で導入するほうがより大きな利益を得られる [20]。しかし、高次数 AS はより多くの AS 間経路で利用されるため、高次数 AS が NDN を導入した場合の方が、全体としての通信遅延削減効果は大きくなる。そこで、複数の NDN 普及モデルを想定し、それぞれの場合における計算機シミュレーションを実施した。想定した NDN の普及モデルシナリオは以下の通りである。

シナリオ 1: 次数が 2 以下の AS のうちからランダムに選択された 70% の AS が NDN を導入する場合

シナリオ 2: 次数が上位 5% のすべての AS と、次数が 2 以下の AS のうちからランダムに選択された 70% の AS が NDN を導入する場合

シナリオ 3: 次数が上位 5% の AS のうちから 50% のランダムに選択された AS と、次数が 2 以下の AS のうちからランダムに選択された 70% の AS が NDN を導入する場合

シナリオ 1 は、利益を得やすい低次数 AS でのみ NDN が導入される比較的現実的な普及モデルを想定したものである。シナリオ 2 はシナリオ 1 の条件に加えて、スーパーハブノードとして働くような次数上位 5% の高次数 AS が NDN を導入するという理想的な普及モデルを想定したものである。しかし、シナリオ 1 もシナリオ 2 も高次数 AS で NDN が一切導入されないか、すべてで導入されるかという極端な想定条件であるため、シナリオ 3 ではシナリオ 1 の条件に加えて、次数上位 5% の高次数 AS のうちから 50% のランダムに選択された AS に NDN を導入させるシナリオ 1 とシナリオ 2 の中間にあたるような普及モデルを想定する。

各 NDN-AS でのキャッシュヒット率が 30%, 60%, 90% とい

う三つの条件で、トラフィック量とパケット転送遅延について分析する。IP-NDN 間のコンテンツ配信において、トラフィック量の大部分は返送される Data パケットによるものである。よって本稿では、Data パケットの経路する平均ホップ数を、トラフィック量を示す指標として扱う。なお、IP-AS のみで構成されているトポロジの場合、返送される Data パケットの平均ホップ数は 4.2714 であった。

本稿でのパケット転送遅延は送信ホストが Interest パケットを送信してから、それに対する Data パケットを受信するまでに要する時間と定義する。ここで考慮する時間は Interest パケットおよび Data パケットの転送時間のみであり、DNS の利用やパケット変換 GW によるヘッダ書き換えなどの処理時間は含まれていない。これは、処理時間が利用するハードウェア性能に大きく依存するためである。実際に使用されるハードウェアはネットワーク事業者ごとに異なると想定され、考慮外のシステムの処理時間として妥当な値を仮定することが困難であることから、ここではパケット転送遅延をこのような単純なものとして定義している。

パケット転送遅延は通信経路として使用される AS 数に比例すると仮定し、平均 RTT (Round Trip Time) は約 296ms とした。シミュレーションで用いた平均 RTT は、複数地域から選択した大学に設置された RIPE Atlas [22] 端末において測定された RTT の平均値である。測定対象とした RIPE Atlas 端末の設置場所は、京都大学 (日本)、ボストン大学 (アメリカ合衆国)、スタンフォード大学 (アメリカ合衆国)、リオ・グランデ・ド・スル大学 (ブラジル)、カルロス三世マドリッド大学 (スペイン)、ハンブルク大学 (ドイツ)、ネルソン・マンデラ大学 (南アフリカ) である。これらの RIPE Atlas 端末に対して ping を送信することで測定を行った。なお、測定結果は 2024 年 5 月 23 日の測定によって得られたものである。

パケット転送遅延は通信経路として使用される AS 数に比例すると仮定しているため、296ms という平均 RTT の値と、各シミュレーションシナリオでの任意の入出力 AS ペア  $s_d$  間に存在する平均 AS 数の商を各 AS あたりのパケット転送遅延としている。パケット転送遅延のシミュレーションでは、IP のみを用いた場合に平均 RTT を 296ms と仮定した値が、NDN を導入した AS を含むトポロジにおいてどのように変化するか調査を行う。

#### 4.1 最小ホップ経路

本節では、経路制御を行わずに単純に最小ホップ数の経路を用いる場合の性能評価結果について述べる。

表 1: Average number of intermediate nodes on a minimum hop-count path

シナリオ 1				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.2714	3.8282	3.3867	2.9474

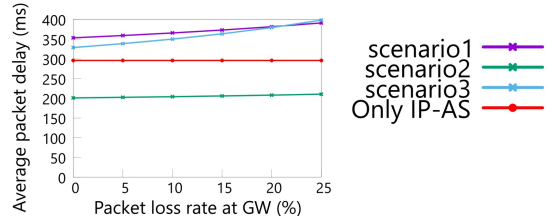
シナリオ 2				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.2714	2.7118	1.8012	1.2957

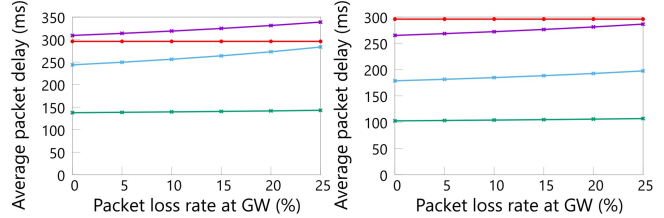
シナリオ 3				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.2714	3.2658	2.4868	1.8920

表 1 は各シナリオでの各 NDN-AS 内キャッシュヒット率における平均経由ノード数を示したものである。この結果からシナリオ 1 で NDN-AS でのキャッシュヒット率が 30% だけであったとしても、IP のみの場合 (平均経由ホップ数 4.2714) より約 10% のトラフィック量削減効果があり、シナリオ 2 で NDN-AS

でのキャッシュヒット率が 90% の場合には約 70% ものトラフィック量削減効果が確認された。



(a) 30% cache hit ratio in NDN-AS



(b) 30% cache hit ratio in NDN-AS (c) 30% cache hit ratio in NDN-AS

図 2: Average packet delay along the minimum hop-count path

図 2 は最小ホップ数経路でのパケット転送遅延シミュレーションの結果を示したものである。NDN-AS でのキャッシュヒット率が 90% と極めて高い場合にはすべての想定状況において IP のみの場合より優れた結果であることが確認された。しかし、NDN-AS でのキャッシュヒット率が 60% の場合にはシナリオ 1 の条件において IP のみの場合より遅延量が増大してしまうことが確認された。また、NDN-AS でのキャッシュヒット率が 30% と低い値であった場合にはシナリオ 1, シナリオ 2 の両条件で IP のみの場合より遅延量が増大することが確認された。さらに、シナリオ 3 は高次数 AS 群の一部で NDN が採用されているに関わらず、パケット変換 GW でのパケットロス率が高い場合にはシナリオ 1 よりも遅延が増大するという結果が確認された。これは NDN-AS でのキャッシュヒット率が 30% しかなかったために、NDN のキャッシュを用いたデータ配信の効果をパケット変換 GW の処理オーバーヘッドが上回ってしまったためである。シナリオ 3 では高次数 AS 群でも NDN-AS が一部存在しているため、最小ホップ数経路での発着 AS ペア  $s_d$  間に存在するパケット変換 GW の数がシナリオ 1 より多くなっていることでこのような結果が得られた。

#### 4.2 NDN-AS 高利用率経路

本節では NDN-AS 高利用率経路でのシミュレーション結果について述べる。

表 2: Average number of intermediate nodes on high utilization NDN-AS paths

シナリオ 1				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.2714	3.8109	3.3576	2.9122

シナリオ 2				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.2717	2.7116	1.8008	1.2954

シナリオ 3				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経由ノード数	4.3666	3.0648	2.2071	1.6504



表2は各シナリオでの各NDN-AS内キャッシュヒット率における平均経路ノード数を示したものである。経路制御を行わない最小ホップ経路の結果と比較すると、NDN-ASでのキャッシュヒット率が0%であった場合のみ平均経路ノード数は増えており、それ以外の条件では平均経路ノード数が減少していることが確認された。これは、各発着ASペア $sd$ 間に存在しているASの数は経路制御の影響で増えているにもかかわらず、NDN-ASからのキャッシュを用いたデータ配信の影響を考慮した場合には最小ホップ経路を用いた場合よりも少ない経路AS数でコンテンツデータの取得に成功していることを示している。したがって、NDN-AS高利用率経路を用いる経路制御手法は、実際のネットワーク上においても、極端にNDN-ASでのキャッシュヒット率が低い場合を除いて有効であると考えられる。

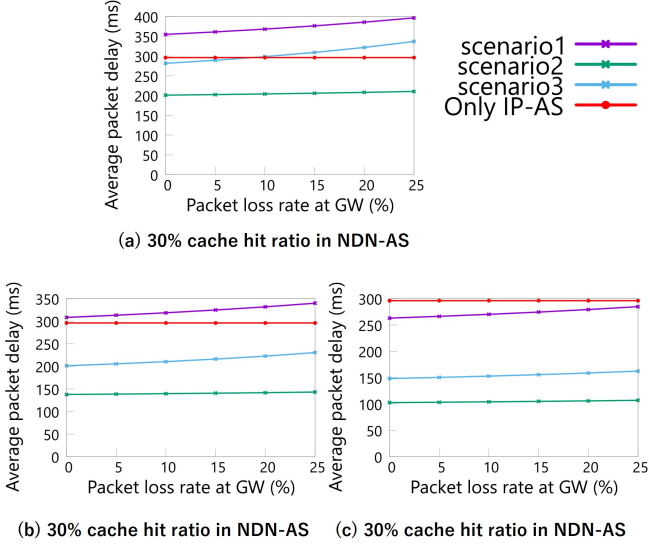


図3: Average packet delay along the high utilization NDN-AS path

図3はNDN-AS高利用率経路でのパケット転送遅延シミュレーションの結果を示したものである。図2の結果と比較するとシナリオ3のパケット転送遅延が大きく減少していることが確認された。これは経路制御の結果として、各発着ASペア $sd$ 間の経路として頻繁に利用される高次数AS群のなかでも特に、NDNを採用しているものがパケット転送経路として頻繁に利用されることで、NDNのキャッシュを用いたデータ配信がより効率に行われたからであると考えられる。

シナリオ3では最小ホップ数経路の結果と大きな差異が認められた一方で、シナリオ1とシナリオ2では僅かな差異しか認められなかった理由として、これらのシナリオでは高次数AS群での採用ASがIPかNDNのどちらか一方で固定されているためと考えられる。このシミュレーションのトポロジでは高次数ASが多数の低次数ASと接続している構造を持っており、低次数ASが低次数AS同士で接続しているようなパスは極めて少ない。したがって低次数AS同士のパスにおいて行われた経路制御の効果は、全体の平均パケット遅延を考慮した際には僅かな影響しか持たない。しかしながら、シナリオ3の結果からも大きな影響度を持つと考えられる、高次数AS群での経路制御は高次数AS群で採用されているプロトコルが固定されているために行われない。このような理由でシナリオ1とシナリオ2は、最小ホップ経路のパケット転送遅延と僅かな差異しかもたなかったと考えられる。

#### 4.3 パケット変換GW低利用率経路

本節ではパケット変換GW低利用率経路でのシミュレーション

ン結果について述べる。

表3: Average number of intermediate nodes on low utilization path via packet translation GW

シナリオ 1				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経路ノード数	4.2722	3.9938	3.3913	2.9536

シナリオ 2				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経路ノード数	4.2719	2.7116	1.8009	1.2956

シナリオ 3				
NDN-AS 内キャッシュヒット率	0%	30%	60%	90%
平均経路ノード数	4.4204	3.3360	2.6204	2.1311

表3は各シナリオでの各NDN-AS内キャッシュヒット率における平均経路ノード数を示したものである。経路制御を行わない最小ホップ経路の結果と比較すると、シナリオ2のNDN-AS内キャッシュヒット率30%、60%、90%の場合でのみ僅かに平均経路ノード数が減少しているが、それ以外の条件では平均経路ノード数は増加する結果が得られた。

パケット変換GW低利用率経路では、同一プロトコルを採用しているASが連続して転送経路として利用されるような状態を発生させるものであるため、NDN-AS高利用率経路のようにNDN-ASによる経路長の短縮効果を保証するものではない。したがって、パケット変換GW低利用率経路を用いる経路制御手法は、実際のネットワーク上においてトラフィック量を増加させる可能性をもつ。

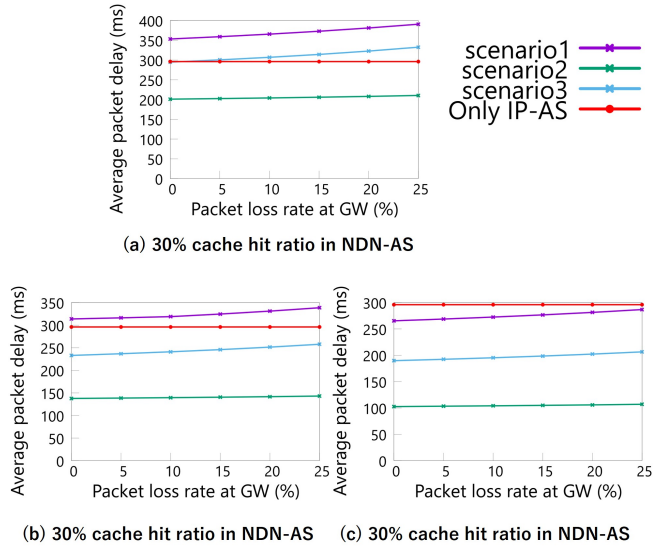


図4: Average packet delay along the low utilization path via packet translation GW

図4はパケット変換GW低利用率経路でのパケット転送遅延シミュレーションの結果を示したものである。図2の結果と比較すると、特にシナリオ3においてパケット変換GWでのパケットロスの上昇に伴う平均パケット転送遅延量の上昇量が少ないことが確認された。この結果から、パケット変換GW低利用率経路を用いる経路制御手法は、パケット変換GWによる処理オーバーヘッドを抑えてIP-NDN間のパケット転送を実現可能であるといえる。

シナリオ1とシナリオ2では、最小ホップ数経路の結果と僅かな差異しか認められなかったがこれは4.2節で述べた理由と

同じであると考えられる。小規模 AS 同士の経路制御が全体の平均パケット遅延に与える影響は僅かなものであるのに対し、大きな影響度を持つ高次数 AS 群の経路制御は、高次数 AS 群内で用いられるプロトコルがシナリオ 1 とシナリオ 2 では固定されているために行われない。したがってシナリオ 1 とシナリオ 2 では最小ホップ数経路の結果と僅かな差異しか認められなかったと考えられる。

## 5. ま と め

本稿ではパケット変換 GW を用いた IP-NDN 間のパケット転送法を用いた場合のグローバルなネットワークにおける NDN のキャッシュ配信による通信性能の影響分析を行った。また、IP と NDN が混在している状況で、各 AS のプロトコルを考慮して AS 間の経路を制御する手法を提案した。数値評価の結果から、NDN の導入による通信性能への影響は、NDN を導入する AS の規模によって大きく変動し、高次数 AS 群での NDN 導入が行われると、トラフィック量の削減効果と低遅延化に大きな効果があることが確認された。また、提案した AS 間経路制御を実行することで、単純にパケットの宛先 AS までの最小ホップ数となる経路を用いる場合よりも、条件次第で低遅延化が実現されることも確認された。

今後の課題としては、経路制御法においてトラフィックの分散を考慮することが挙げられる。本稿の評価では、NDN-AS 高利用率経路が多く条件で優れた結果を示していたが、この経路を利用すると NDN-AS に多量のトラフィックが流入し、IP-AS と NDN-AS とで処理負担に大きな差が生じる可能性がある。そこで、特定の AS にトラフィックが集中して流入するような状態を避けつつ、通信性能を損なわないような経路制御法の考案が課題となる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (25K03113, 23K28078) の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] Feri Fahrianto and Noriaki Kamiyama, Migrating from IP to NDN Using Dual-Channel Translation Gateway, IEEE Access, Vol. 10, pp. 70252-70268, Jul. 2022
- [2] Feri Fahrianto and Noriaki Kamiyama, Comparison of migration approaches of ICN/NDN on IP networks, in Proc. 5th Int. Conf. Informat. Comput. (ICIC), Nov. 2020
- [3] Van Jacobson, Diana K. Smetters, James D. Thornton, Michael F. Plass, Nicholas H. Briggs and Rebecca L. Brannard, Networking Named Content, ACM CoNEXT 2009, Dec 2009
- [4] Hitoshi Asaeda, Kazuhisa Matsuzono, Yusaku Hayamizu, Htet Hlaing, and Atsushi Ooka, A Survey of Information-Centric Networking: The Quest for Innovation, IEEE TRANSACTIONS on Communications, Vol.E107-B, NO.1, pp.139-153 Jan 2024
- [5] Lixia Zhang, Alexander Afanasyev, Jeffrey Burke, Van Jacobson, kc claffy, Patrick Crowley, Christos Papadopoulos, Lan Wang, Beichuan Zhang, Named Data Networking, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 44, No. 3, pp. 66-73, Jul. 2014
- [6] Kohei Tanaka, Noriaki Kamiyama. Name Resolution and Packet Forwarding in IP/NDN Mixed Environment, The 40th International Conference on Information Networking (ICOIN 2026), Jan. 2026
- [7] Giovanna Carofiglio, Luca Muscariello, Jordan Augé, Michele Papalini, Mauro Sardara, Alberto Compagno, Enabling ICN in the Internet Protocol: Analysis and Evaluation of the Hybrid-ICN Architecture, ICN '19: Proceedings of the 6th ACM Conference on Information-Centric Networking
- [8] Samar Shailendra, Bighnaraj Panigrahi, Hemant Kumar

- Rath, Anantha Simha, A Novel Overlay Architecture for Information Centric Networking, 2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC), Feb 2015
- [9] Dirk Trossen, Martin J. Reed, Janne Riihijärvi, Michael Georgiades, Nikos Fotiou, George Xylomenos, IP Over ICN - The Better IP? , 2015 European conference on networks and communications (EuCNC), Jun. 2015
- [10] Ying Zhang, Mallik Tatipamula, Characterization and Design of Effective BGP AS-PATH Prepending, 2011 19th IEEE International Conference on Network Protocols, Oct. 2011
- [11] Alexander Afanasyev, Xiaoke Jiang, Yingdi Yu, Jiewen Tan, Yumin Xia, Allison Mankin, Lixia Zhang, NDNS: A DNS-Like Name Service for NDN, 2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Aug 2017
- [12] Pedro Marcos, Lars Prehn, Lucas Leal, Alberto Dainotti, Anja Feldmann, Marinho Barcellos, AS-Path Prepending: there is no rose without a thorn, IMC '20: Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference, Oct. 2020
- [13] Ying Zhang, Makan Pourzandi, Studying Impacts of Prefix Interception Attack by Exploring BGP AS-PATH Prepending, International Conference on Distributed Computing Systems, Jun. 2012
- [14] Samantha Lo, Rocky K. C. Chang, Lorenzo Colitti, An Active Approach to Measuring Routing Dynamics Induced by Autonomous Systems, Workshop of Experimental Computer Science (ExpCS), ACM (2007)
- [15] Julien Gamba, Romain Fontugne, Cristel Pelsser, Randy Bush, Emile Aben. BGP Table Fragmentation: what & who?, In Rencontres Francophones sur la Conception de Protocoles, l'Évaluation de Performance et l'Expérimentation des Réseaux de Communication, May. 2017
- [16] Benoit Donnet, Olivier Bonaventure, On BGP communities, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol.38, No. 2, pp. 55-59, Mar. 2008
- [17] Florian Streibelt, Franziska Lichtblau, Robert Beverly, Anja Feldmann, Cristel Pelsser, Georgios Smaragdakis, Randy Bush, BGP Communities: Even more Worms in the Routing Can, Proceedings of the Internet Measurement Conference 2018, Nov. 2018
- [18] Nick Feamster, Jay Borkenhagen, Jennifer Rexford, Guidelines for Interdomain Traffic Engineering, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 33, No. 5, pp. 19-30, Oct. 2003
- [19] Bangbang Ren, Deke Guo, Guoming Tang, Weijun Wang, Lailong Luo, Xiaoming Fu. SRUF: Low-Latency Path Routing with SRv6 Underlay Federation in Wide Area Network, 2021 IEEE 41st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Jul. 2021
- [20] Shuntaro Hashimoto, Makoto Misumi, and Noriaki Kamiyama, Analysis of Diffusion Process of ICN Based on Economic Factors, IEEE/IFIP NOMS 2024 (Short Paper)
- [21] Manar Aldaoud, Dawood Al-Abri, Medhat Awadalla, Firdous Kausar, NBGP: An efficient BGP routing protocol adaptation for named data networking, International Journal of Communication Systems, Vol 35, Issue 14, e5266.
- [22] RIPE NCC, RIPE Atlas - RIPE Network Coordination Centre, <https://www.ripe.net/analyse/internet-measurements/ripe-atlas/>
- [23] CAIDA, "Autonomous System Taxonomy Repository", 2013-11-6, <https://www.caida.org/catalog/datasets/as-taxonomy/> (参照 2024-09-14)
- [24] Cisco, BGP 最適パスアルゴリズムの選択, [https://www.cisco.com/c/ja\\_jp/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/13753-25.html](https://www.cisco.com/c/ja_jp/support/docs/ip/border-gateway-protocol-bgp/13753-25.html)(参照 2026-01-11)