

令和5年度 秋学期 卒業研究3 (BI)  
学士論文

題目 IP/NDN間の名前解決と  
パケット転送法

指導教員 上山憲昭 教授

立命館大学 情報理工学部 セキュリティ・ネットワークコース

学籍番号 2600200243-3

田中晃平

令和6年1月31日

## 概要

IoT データの運用やコンテンツ配信を効率に行うことが可能な次世代のネットワークアーキテクチャである、情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) が注目を集めている。NDN (named data networking) は US Future Internet Architecture program のプロジェクトで研究が進められたアーキテクチャであり、ICN の中でも特に注目を集めているものである。しかし、将来 NDN を実装する際に、現在利用されている IP ネットワークは完全に廃止されるのではなく、IP と NDN の混在環境が発生すると想定される。本稿では、IP ネットワークと NDN ネットワークの境界に存在する Gateway (GW) をパケット変換 GW とし、パケット変換 GW でパケットの変換に必要な情報を管理させることで IP-NDN 間での Interest 転送及び Data パケット転送を実現するための手法について提案する。GW でパケットの変換を行うという手法は先行研究で提案されたパケット変換 GW を扱うが、本稿ではその先行研究の課題に着目し新しいパケットの変換法を提案する。

# 目次

概要	1
<b>第 1 章 序論</b>	<b>3</b>
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
<b>第 2 章 関連研究</b>	<b>5</b>
2.1 NDN の概要	5
2.2 パケット変換 GW	5
2.3 AS 間ルーティング	6
<b>第 3 章 提案手法: 事前処理</b>	<b>8</b>
3.1 FIB の設定	8
3.2 NDN コンテンツの DNS 登録	8
<b>第 4 章 提案手法: パケット転送処理</b>	<b>10</b>
4.1 ホスト情報	10
4.2 IP-AS と NDN-AS が 1 対 1 の通信	10
4.2.1 IP-AS から NDN-AS への通信	10
4.2.2 NDN-AS から IP-AS への通信	11
4.3 2 つ以上の GW を介した IP-NDN 間の通信	13
4.3.1 NDN-AS を経由した IP-AS 間の通信	13
4.3.2 IP-AS を経由した NDN-AS 間の通信	14
4.3.3 3 つ以上の GW を介した通信	16
<b>第 5 章 まとめ</b>	<b>17</b>
謝辞	18
学会発表リスト	20

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

現在のインターネットは、IP アドレスに基づき通信相手を識別しパケット転送を行う Host centric な IP ネットワークが採用されている。これはインターネットが誕生した当初は電子メールのような通信相手を特定したサービスが主流であったためである。しかし、現在のインターネットの主要サービスはコンテンツ配信へと変化している。さらに近年の IoT の普及等によりインターネットの環境が大きく変化したことにより Host centric なネットワークは非効率的となってきている。そこで、Publisher(コンテンツを要求するユーザ) がコンテンツの名称で Interest という配信要求パケットを Subscriber(コンテンツの提供者) に転送する NDN が次世代のネットワークとして注目されている。現在のインターネットの諸問題に対応することが可能な NDN は、次世代のネットワークとして注目を集めている。

## 1.2 研究の目的

NDN は ISP (Internet Service Provider) やネットワーク事業者等が独自に運営する Autonomous System (AS) の単位で導入されるため、インターネットの全てのルータを NDN ルータに置き換え、全てのホストが NDN で通信を行う環境は非現実的である。よって、NDN は現在のネットワークを部分的に IP から NDN へと置き換える事により、徐々に普及すると想定される。つまり、NDN の普及過程では IP の AS と NDN の AS が混在する状態が発生すると想定される。

NDN の普及のためには、本稿で想定するような IP と NDN の混在環境でも、異種のネットワークを経由してホスト間でのパケットを転送する仕組みが必要となるが、IP と NDN ではパケット転送のために必要となる情報が異なり、IP ネットワークでは IP アドレスにもとづいた通信相手に対してパケットを転送するため IP アドレスが必要となるが、NDN ではコンテンツの名称で Interest を転送しコンテンツを取得するため、IP アドレスではなく要求するコンテンツの名称が必要となるという違いがある。この相違点により、IP-AS と NDN-AS を単純に接続しただけでは IP-NDN 間での通信は不可能である。この問題を解決するためにはパケットのヘッダを書き換え、IP のパケットと NDN のパケットを相互に変換する仕組みが必要となる。

AS と AS の境界には AS 同士を接続する GW が存在する。先行研究では IP-AS と NDN-AS の境界に存在している GW をパケット変換機能を有したものに置き換え、IP アドレスとコンテンツ名の対応を管理する Name Resolution Service (NRS) サーバが存在するという前提で、そのサーバの情報を GW がキャッシュし、その対応に基づいて GW で IP パ

ケットと NDN パケットを変換する手法が提案された [1]. しかし, NRS での対応表をどのように作成するかについては未検討である. 本稿では NRS ではなく, GW に IP コンテンツ名変換テーブル (INCT: IP-content name conversion table) というテーブルを用意し, この INCT で IP アドレスとコンテンツ名の対応を管理する手法を提案する. また, このパケット変換 GW でのパケット変換法と共に, IP/NDN 間でのパケット転送を行う際に必要となる処理を明らかにし, その手法を提案する.

## 第2章 関連研究

### 2.1 NDNの概要

NDNはICNのアーキテクチャの一種として提案されたものであり、現在最も盛んに研究が行われているものである。ICNの最大の特徴は、コンテンツの名称でInterestをネットワークへと転送可能であるという点である。従来のIPネットワークではパケット転送のために目的ホストを特定する必要があり、Domain Name System (DNS)がドメイン名から目的ホストのIPアドレスを解決するという処理をアプリケーション層の機能として提供している。一方、ICNはコンテンツ名をパケットのヘッダに記述してパケットの転送が可能であり、名前解決機能はネットワーク層の機能として提供される。これにより、ICNではネットワークのトポロジやリンクの負荷状況に応じ、適切な配信元の選択が可能となる。また、ルータがコンテンツの名称を把握可能なため、ルータでコンテンツをキャッシュすることが可能である。したがって、Interestが到達したルータで目的のコンテンツがキャッシュされていた場合、そのルータからコンテンツの配信を行う等効率的なコンテンツ配信を実現できる。

NDNではルータは2つのテーブルを所持している。1つは到達した要求パケットを次に転送すべき隣接ルータ (NH: next hop) を調べるFIB (Forwarding Information Base) であり、もう1つは要求パケットが到着した隣接ルータ (PH: previous hop) を記録するPIT (Pending Interest Table) である。

FIBの、ある特定のコンテンツに対するNHが設定されるタイミングはコンテンツの公開が完了した後である。具体的には、コンテンツが公開された時、そのコンテンツのPublisherが接続しているルータが隣接ルータに対して公開されたコンテンツの名称を広告し、さらに広告をうけたルータが隣接ルータに広告するという処理を繰り返すことによって、InterestがPublisherのもとに到達するようFIBが設定される。

PITはルータがInterestを受信したタイミングで更新される。Interestを受信したルータは、そのInterestの転送元ルータをPITに記録した後に、FIBの情報に従いInterestを転送する。PublisherにInterestが到達するとPublisherは要求されたコンテンツを送信するが、そのコンテンツの転送経路はPITに記録された情報に基づき、ユーザホストが送信したInterestの転送経路の逆順でユーザホストのもとに転送される。またこの際、コンテンツの転送が完了したルータはPITの該当エントリの削除を行う。

### 2.2 パケット変換GW

本稿で扱うパケット変換GWは[1]で提案されたDual-Channel Translation Gatewayをもとにしたものとなっている。パケット変換GWでは、IPのパケットをNDNのパケット

に変換する際には、パケットのヘッダを IP アドレスからコンテンツ名に書き換え、NDN のパケットを IP のパケットに変換する場合にはパケットのヘッダをコンテンツ名から IP アドレスに書き換えるというようにして変換処理を行っている。そのためこのパケット変換 GW を使ったパケット変換では、要求するコンテンツに対して、そのコンテンツの名称と IP アドレスの対応表が必要となる。

[1] では IP アドレスとコンテンツ名の対応を管理する Name Resolution Service (NRS) サーバが存在するという前提で、そのサーバの情報を GW がキャッシュし、その対応に基づいて GW で IP パケットと NDN パケットを変換する手法が提案された。しかし、NRS での対応表をどのように作成するかについては未検討である。本稿では NRS ではなく、GW に INCT というテーブルを用意し、この INCT で IP アドレスとコンテンツ名の対応を管理する。

### 2.3 AS 間ルーティング

インターネットは AS の単位で複数の独立したネットワークが組み合わさって構成されている。したがって、AS 間でパケット転送を行うためには AS がどのように接続しているかという情報を AS 間で共有し、AS 間のルーティング情報を用意する必要がある。しかし、AS には各 AS を管理する ISP やネットワーク事業者によるルーティングポリシーが存在するため、単純なリンクステート型ルーティングを使用することが不可能である。そこで、現在のインターネットで使用されている AS 間ルーティングプロトコルが BGP (Border Gateway Protocol)[2] である。

BGP では、AS は各 AS に固有の番号 (AS 番号) が割り振られ、この番号によって各 AS への経路を識別する。AS は隣接する AS と AS 間の経路情報を交換する。これにより、IP アドレスプレフィックスで表される宛先への経路を隣接 AS に伝達する。BGP は距離ベクトルアルゴリズムをもとにしたアルゴリズムを採用しているため、隣接 AS から経路情報を受け取った時に、より良い経路が存在していた場合経路テーブルを更新する。経路テーブルが更新されると、その更新された経路情報を隣接 AS に広告し、ネットワーク全体で常に最新の経路を利用可能にする。BGP での経路情報の広告では経由した AS のリストである AS パスが含まれる。隣接ルータに経路情報を広告する場合、AS は自身の AS 番号を AS パスに追加する。これにより、一度広告した経路情報が他の AS を経由して再び同一の AS に転送されることがなくなりループの発生を阻止する。また、BGP ではパスの候補が複数存在する場合、各 AS にとって最良のパスを選択し、そのパスのみを隣接 AS に広告する。

BGP 広告には eBGP と iBGP の 2 種類が存在する。eBGP は隣接する AS 間で経路情報を交換するためのものであり、隣接 AS との境界に存在するルータ間で広告される。それに対して、iBGP は AS 内のルータ間で経路情報を広告するためのものである。これら 2 種の BGP 広告を利用し各 AS の各ルータに経路情報を伝達することで、AS を経由した通信を可能としている。

NDN ではパケットの転送に IP アドレスではなくコンテンツの名称を用いる。このように従来の IP ネットワークとは異なるパケット転送法を扱う NDN-AS が、IP-AS と混在している場合でも AS を経由したパケット転送を行う場合には AS 間ルーティングが必要と

なる．本稿では IP-AS と NDN-AS が混在している環境でも BGP での AS 間ルーティングが成立するという前提で，パケット転送法を提案する．

## 第3章 提案手法: 事前処理

本稿で提案する手法はパケットの転送前に行う事前処理と、異種の AS を経由してパケットを転送するためのパケット変換を行うパケット転送処理の 2 部構成となっている。本章では事前処理として必要となる 2 つの処理について紹介し、その詳細について述べる。

### 3.1 FIB の設定

1 つ目の事前処理は NDN ルータの FIB を設定する処理である。本稿では、NDN-AS 内に存在しているルータの FIB は 2.1 節で述べたような従来通りの手法で設定する。しかし、従来通りの手法と同じままだと、IP-AS に存在しているコンテンツや IP-AS を挟んで存在している NDN-AS に存在しているコンテンツのような、NDN-AS 内の FIB にエントリが存在しないコンテンツに対する Interest(解決不可能 Interest) は NH が解決不可能になる。そこで、FIB に存在しないエントリに対する要求は全てパケット変換 GW に転送されるという設定を付け加える。また、1 つの NDN-AS に複数のパケット変換 GW が接続されている場合は、Interest が転送されたルータからみて最も近い GW に転送されるように設定を行う。また、2 つ以上のパケット変換 GW を介した通信を行う際にパケット変換 GW が、転送する Interest が解決不可能 Interest であるかを判断する必要があるため、パケット変換 GW は接続している NDN ルータと FIB を共有する。パケット変換 GW に転送された Interest に対する処理の詳細については第 4 章で述べる。

### 3.2 NDN コンテンツの DNS 登録

NDN-AS 上に存在するコンテンツを DNS に登録するという処理も必要となる。IP ネットワークを利用するユーザホストは、コンテンツが存在している場所が IP ネットワークか NDN ネットワークかに関わらず、IP アドレスでパケットの転送先を特定してから通信を開始する必要がある。しかし、NDN では IP アドレスを使用しないため、NDN ネットワークで公開されたコンテンツには IP アドレスが存在しない。したがって、IP-AS と NDN-AS が共存する環境では、NDN コンテンツに対応する IP アドレスを割りあてる必要がある。本稿ではこの問題をパケット変換 GW の IP アドレスを利用することにより解決する。図 3.1 は本稿で提案する、NDN コンテンツを DNS に登録する方法を示した図である。NDN では新しいコンテンツが公開されると、その公開されたコンテンツの Publisher が接続しているルータが、隣接ルータに対して公開されたコンテンツを広告する (①)。2.1 節で述べた様に公開された新しいコンテンツの名称は隣接ルータ間での広告を繰り返すことにより、NDN-AS 内全体へと拡散される。この際、ルータだけでなくパケット変換 GW に対しても公開されたコンテンツを広告する。これにより、パケット変換 GW は接続し

ている NDN-AS で新しく公開されたコンテンツの情報を取得できる (②). パケット変換 GW は新しいコンテンツの広告を受け取ると, そのパケット変換 GW 自身の IP アドレスと広告されたコンテンツの名称を用いて DNS に新しいエントリを追加する. 図 3.1 を例にすると, "P" という Prefix のコンテンツが公開された場合, パケット変換 GW 自身の IP アドレス "G" を用いて, IP アドレスが G・ドメイン名が P というエントリを DNS に追加する (③). この処理を行うことにより, IP ユーザホストがコンテンツ P を要求すると DNS からパケット変換 GW の IP アドレスが取得可能となるので, パケット変換 GW に対して IP-Interest を転送することが可能となる. パケット変換 GW に Interest を転送することに成功すれば, 第 4 章に述べる処理により, IP-Interest を NDN-Interest に変換し目的コンテンツのサーバまで Interest を転送することが可能となる.

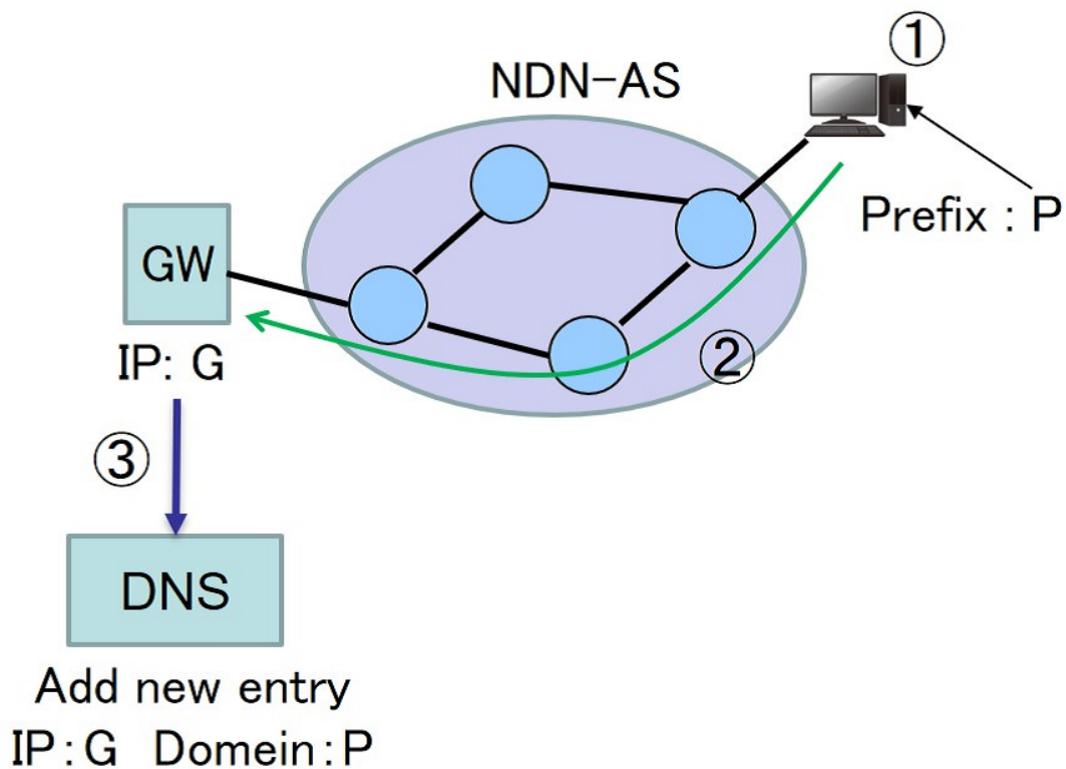


図 3.1: Method for Registering NDN Content in DNS

## 第4章 提案手法: パケット転送処理

### 4.1 ホスト情報

パケットの変換に必要となる IP アドレスとコンテンツの名称の対応表は、ホスト情報として INCT に登録することにより用意する。IP ネットワークを利用するユーザホストが INCT に登録するホスト情報 (IP ホスト情報) は、Interest を転送するホスト自身の IP アドレスと、そのホストが要求しているコンテンツの名称の2つである。また、NDN ネットワークを利用するユーザホストが INCT に登録するホスト情報 (NDN ホスト情報) は Interest の宛先の IP アドレス、使用しているポート番号、要求しているコンテンツの名称の3つである。これらの INCT に登録されるホスト情報がパケット転送時にどのようにして利用されるかは次節以降のパケット転送の詳細な手順で述べる。

### 4.2 IP-AS と NDN-AS が1対1の通信

#### 4.2.1 IP-AS から NDN-AS への通信

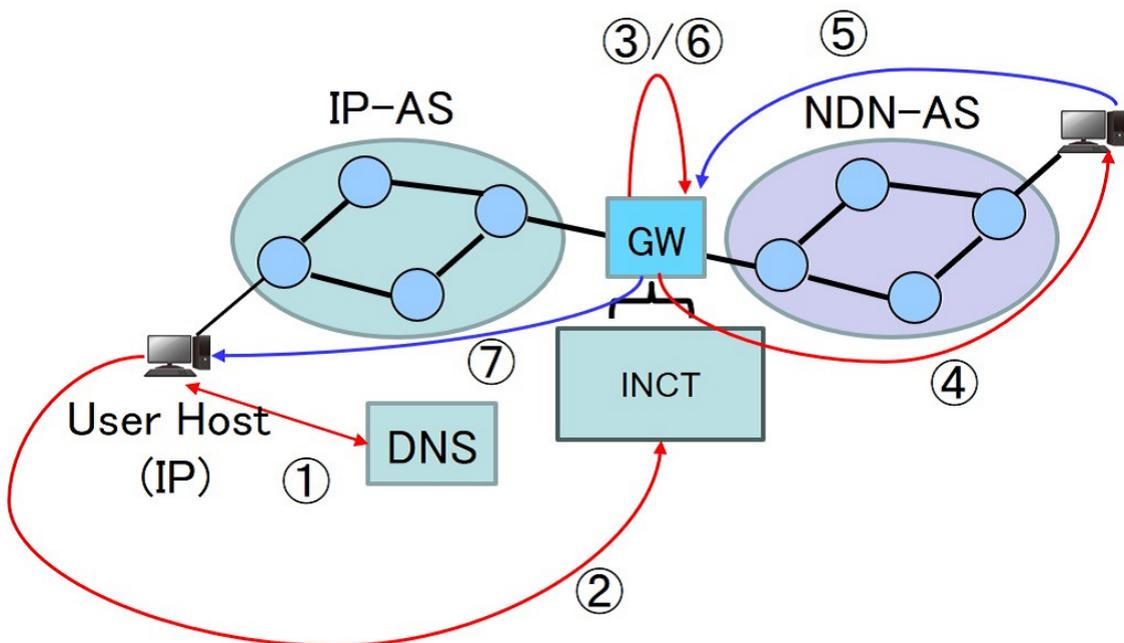


図 4.1: Request packet forwarding from IP-AS to NDN-AS and data packet forwarding from NDN-AS to IP-AS

図 4.1 は IP-AS から NDN-AS への Interest パケット転送と、NDN-AS から IP-AS への Data パケット転送を行う際の手順を示している。ユーザホストが IP-AS 上に存在し NDN-AS 上のコンテンツを取得する場合、最初にユーザは DNS サーバで名前解決を行う (①)。

この①で取得する IP アドレスは 3.2 節の処理により、パケット変換 GW の IP アドレスとなる。よってユーザホストが転送する IP-Interest はパケット変換 GW へと転送される。パケット変換 GW に IP-Interest が到達すると、パケット変換 GW は IP-Interest の転送元の IP アドレスが INCT に登録されているものかを確認する。Interest の転送元の IP アドレスが INCT に登録されていない場合は、ユーザホストに対して、INCT への IP ホスト情報登録要請パケットを転送するように通知する。IP ホスト情報登録要請パケットは GW に対して転送される、要求コンテンツの名称を GW に伝達するためのパケットである。ユーザホストは通知を受けると IP ホスト情報登録要請パケットをパケット変換 GW へと転送する (②)。

パケット変換 GW は IP ホスト情報登録要請パケットを受信すると、IP ホスト情報登録要請パケットの転送元の IP アドレスからユーザホストの IP アドレス、伝達されたコンテンツの名称からユーザホストの要求しているコンテンツの名称をそれぞれ INCT に登録する。また、同時に IP ホスト情報登録要請パケットから取得したコンテンツの名称を用いて IP-Interest のヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Interest に変換する (③)。

変換された NDN-Interest は NDN-AS 内で FIB に従い転送され、目的のコンテンツを取得する (④)。

取得したコンテンツの NDN-Data パケットは PIT に従い、パケット変換 GW のもとに転送される (⑤)。

パケット変換 GW は転送された NDN-Data パケットのコンテンツ名を INCT から検索し、そのコンテンツを要求していたユーザホストの IP アドレスを用いて、NDN-Data パケットのヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Data パケットに変換する (⑥)。

変換された IP-Data パケットはユーザホストに転送され、通信を終了する (⑦)。また、パケット変換 GW は変換した IP-Data パケットを転送後、INCT から転送先のユーザホストのホスト情報を削除する。

#### 4.2.2 NDN-AS から IP-AS への通信

図 4.2 は IP-AS から NDN-AS への Interest パケット転送と、NDN-AS から IP-AS への Data パケット転送を行う際の手順を示している。ユーザホストが NDN-AS 上に存在し IP-AS 上のコンテンツを取得する場合、3.1 節で示した通り、パケット変換 GW へと NDN-Interest が転送される (①)。

パケット変換 GW では DNS サーバを用いて、目的コンテンツの IP アドレスを取得する。この IP アドレスはパケット変換 GW でキャッシュされ、同時に INCT に Interest の宛先 IP アドレスとして登録される。また、ここで取得した IP アドレスを用いて NDN-Interest のヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Interest に変換する。NDN

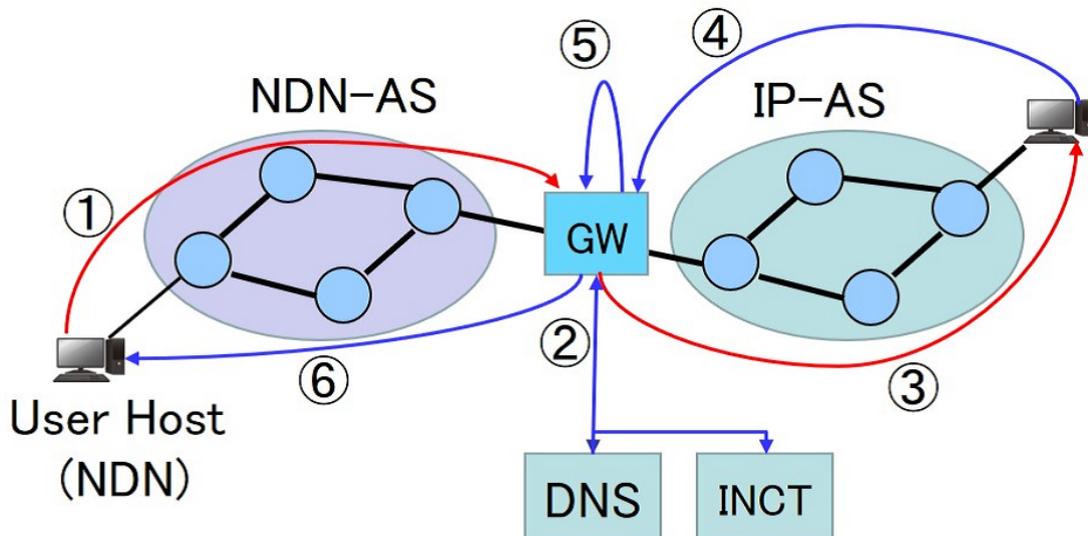


図 4.2: Request packet forwarding from NDN-AS to IP-AS and data packet forwarding from IP-AS to NDN-AS

ホスト情報を INCT に登録するため、転送された NDN-Interest のパケットヘッダから要求コンテンツの名称、変換した IP-Interest を転送する際に使用するポート番号の 2 つの情報も Interest の宛先 IP アドレスとともに INCT に登録する。NDN ホスト情報で登録されるポート番号は、コンテンツ取得後に Data パケットのコンテンツの名称を、INCT に登録されているものから特定するために使用される。パケット変換 GW に到達した Interest が、既に IP アドレスがパケット変換 GW にキャッシュされているコンテンツに対する Interest であった場合はそのキャッシュされている IP アドレスを利用することにより、人気度の高いコンテンツに対する NDN-Interest を効率的に変換する (②)。

変換された IP-Interest は IP-AS 内で転送され、目的のコンテンツを取得する (③)。

取得したコンテンツの IP-Data パケットは IP-Interest の転送元であったパケット変換 GW に転送される (④)。

パケット変換 GW は転送された IP-Data パケットの転送元の IP アドレスを INCT から検索し、その Data パケットのコンテンツの名称を取得する。この時、INCT に登録されていたポート番号が、転送された Data パケットの識別記号として利用される。このコンテンツの名称を用いて、IP-Data パケットのヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Data パケットに変換する (⑤)。

その後 PIT に従い、変換された NDN-Data パケットはユーザホストに転送され、通信を終了する (⑥)。また、パケット変換 GW は変換した NDN-Data パケットを転送後、INCT から転送先のユーザホストのホスト情報を削除する。

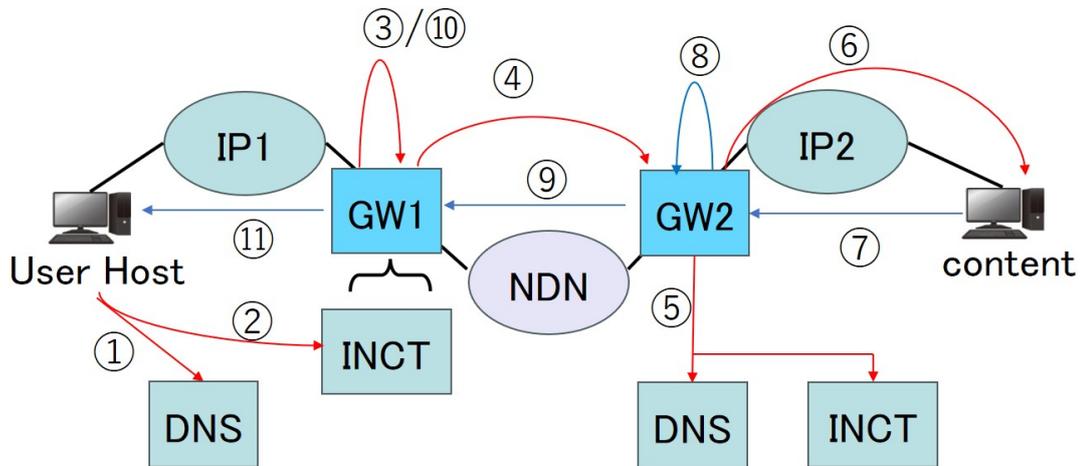


図 4.3: Packet Transfer between IP-AS across NDN-AS

### 4.3 2つ以上のGWを介したIP-NDN間の通信

#### 4.3.1 NDN-ASを経由したIP-AS間の通信

図 4.3 は NDN-AS を経由して IP-AS 間でパケット転送を行う際の手順を示している。この図の場合、最初にユーザは DNS サーバで名前解決を行う (①)。

これにより Interest の転送先を決定する。本稿では、BGP による AS 間ルーティングにより AS 間のパケット転送経路が転送開始前に判明するという前提のため、この図の場合では GW1 でパケットの変換を行い NDN-AS を経由して目的のコンテンツを取得するためのパケット転送を行う。ユーザホストが IP-Interest を転送し、その IP-Interest が GW1 に到達すると、GW1 は IP-Interest の転送元の IP アドレスが INCT に登録されているものかを確認する。Interest の転送元の IP アドレスが INCT に登録されていない場合は、ユーザホストに対して、INCT への IP ホスト情報登録要請パケットを転送するように通知する。ユーザホストは通知を受けると IP ホスト情報登録要請パケットを GW1 に転送する (②)。

ここで使用される IP ホスト情報登録要請パケットは 4.2.1 で示したものと同様であり、

GW1 は IP ホスト情報登録要請パケットを受信すると、ユーザホストの IP アドレスと要求コンテンツの名称を INCT に登録する。同時に IP ホスト情報登録要請パケットから取得したコンテンツの名称を用いて、IP-Interest のヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Interest に変換する (③)。

この時、変換した NDN-Interest をそのまま NDN-AS に転送した場合 FIB で解決できず、GW1 と接続している NDN ルータは転送された Interest を GW1 へと戻してしまう。そのため、パケット変換 GW は変換した NDN-Interest が解決不可能 Interest となってしまう場合、GW1 が新たなユーザホストとしてふるまい、GW2 に対して各パケット変換 GW の個別の識別名をパケットのヘッダに用いて、INCT 操作 Interest を転送する。INCT 操作 Interest はパケット変換 GW の個別の識別名をパケットのヘッダに用いた、通常の NDN-Interest の役割を代替するものであり、パケット変換 GW にパケットのヘッダのみ

ではなく、パケット全体を解析させることによって要求コンテンツの名称をパケット変換 GW に伝達するものである (④)。

パケット変換 GW は接続している NDN ルータと FIB を共有しているため、この図 4.3 の場合では転送する NDN-Interest は解決不可能 Interest であることが分かる。GW2 はパケットのヘッダが GW2 の識別名である Interest は INCT 操作 Interest であることが分かるので、要求コンテンツの名称を INCT 操作 Interest から取得し、その名称を用いて DNS で名前解決を行う。また、このときに取得した IP アドレスは GW2 でキャッシュされ、さらに IP アドレスとコンテンツの名称、ポート番号の 3 つの情報を INCT に NDN ホスト情報として登録する (⑤)。

取得した IP アドレスを用いて NDN-Interest のヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Interest に変換し、IP-AS2 へと IP-Interest を転送する。変換された IP-Interest は IP-AS 内で目的コンテンツのサーバまで転送され、目的のコンテンツを取得する (⑥)。

このとき、⑥で転送された Interest の転送元は GW2 であるため、取得したコンテンツの IP-Data パケットは GW2 の IP アドレスを宛先 IP アドレスとして転送される (⑦)。

GW2 は転送された IP-Data パケットの転送元の IP アドレスを INCT から検索し、その Data パケットのコンテンツの名称を取得する。このコンテンツの名称を用いて、IP-Data パケットのヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Data パケットに変換する。この時、INCT に登録されていたポート番号が、GW2 に転送された Data パケットの識別記号として利用される (⑧)。

変換された NDN-Data パケットを NDN-AS 内に転送する (⑨)。

PIT に従い転送される NDN-Data パケットが GW1 に到達すると、GW1 は転送された NDN-Data パケットのコンテンツ名を INCT から検索し、そのコンテンツを要求していたユーザホストの IP アドレスを用いて、NDN-Data パケットのヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Data パケットに変換する (⑩)。

変換された IP-Data パケットはユーザホストに転送され、通信を終了する (⑪)。2 つ以上の GW を介した通信の場合でも、4.2 節と同様に変換した Data パケットの転送後は、INCT から転送先のユーザホストのホスト情報を削除し、ユーザホストのもとに Data パケットを転送し通信を終了する。

### 4.3.2 IP-AS を経由した NDN-AS 間の通信

図 4.4 は IP-AS を経由して NDN-AS 間でパケット転送を行う際の手順を示している。この図の場合、最初に 3.1 節で示した通り、GW1 へと NDN-Interest が転送される (①)。

GW1 では DNS サーバを用いて、目的コンテンツの IP アドレスを取得する。この時、3.2 節で示した通り GW2 の IP アドレスを DNS サーバから取得する。この IP アドレスはパケット変換 GW でキャッシュされ、同時に INCT に Interest の宛先 IP アドレスとして登録される。また、ここで取得した IP アドレスを用いて NDN-Interest のヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Interest に変換する。NDN ホスト情報を INCT に登録するため、転送された NDN-Interest のパケットヘッダから要求コンテンツの名称、変換した IP-Interest を転送する際に使用するポート番号の 2 つの情報も Interest

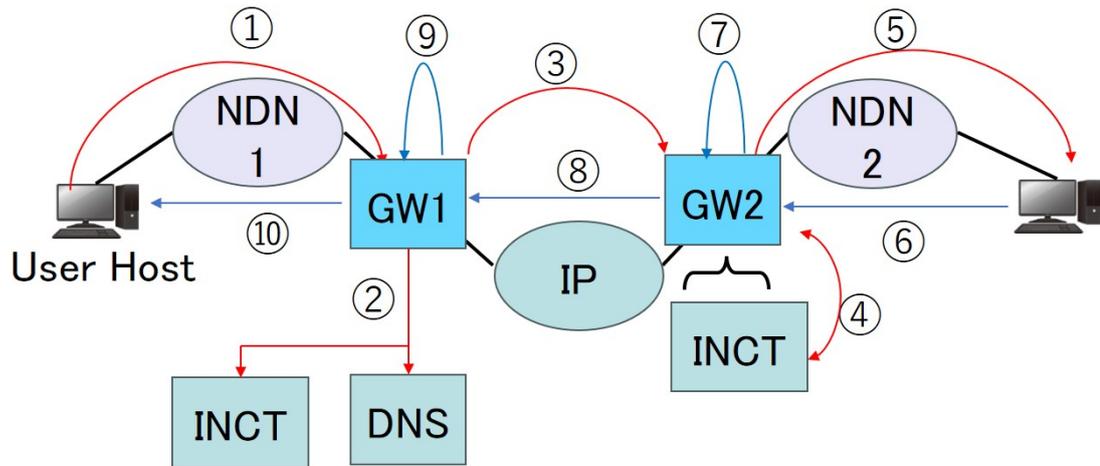


図 4.4: Packet Transfer between NDN-AS across IP-AS

の宛先 IP アドレスとともに INCT に登録する (②).

パケット変換 GW が IP-Interest を転送する場合、コンテンツを取得する前にパケット変換 GW でのパケット変換を行う必要がある時には変換を行う GW に対して、IP-Interest ではなく IP ホスト情報登録要請パケットを直接転送する。これにより、同一のパケット変換 GW が複数の IP ホスト情報を INCT に登録することが可能になる (③).

GW2 は IP ホスト情報登録要請パケットを受信すると、IP ホスト情報登録要請パケットの転送元の IP アドレスからユーザホストの IP アドレス、伝達されたコンテンツの名称からユーザホストの要求しているコンテンツの名称をそれぞれ INCT に登録する。また、同時に IP ホスト情報登録要請パケットから取得したコンテンツの名称を用いて IP-Interest のヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Interest に変換する (④). 変換した NDN-Interest は NDN-AS2 に転送され、目的のコンテンツを取得する (⑤).

取得したコンテンツの NDN-Data パケットは PIT に従い、GW2 に転送される (⑥).

GW2 が NDN-Data パケットを受信すると、GW2 は転送された NDN-Data パケットのコンテンツ名を INCT から検索し、そのコンテンツを要求していたユーザホストの IP アドレスを用いて、NDN-Data パケットのヘッダをコンテンツの名称から IP アドレスへと書き換え IP-Data パケットに変換する (⑦).

GW2 に IP ホスト情報を登録したのは GW1 のため、変換された IP-Data パケットの宛先 IP アドレスは GW1 の IP アドレスとなる。したがって変換された IP-Data パケットは GW1 に転送される (⑧).

GW1 が IP-Data パケットを取得すると、GW1 は転送された IP-Data パケットの転送元の IP アドレスを INCT から検索し、その Data パケットのコンテンツの名称を取得する。このコンテンツの名称を用いて、IP-Data パケットのヘッダを IP アドレスからコンテンツの名称へと書き換え NDN-Data パケットに変換する。この時、INCT に登録されていたポート番号が、GW1 に転送された Data パケットの識別記号として利用される (⑨).

その後 PIT に従い、変換された NDN-Data パケットはユーザホストに転送され、通信を終了する (⑩).

### 4.3.3 3つ以上の GW を介した通信

3つ以上の GW を介して複数回 IP-AS と NDN-AS を経由する必要がある場合でも、図 4.3 と図 4.4 の構造の部分的な繰り返しとなっているため、Interest の転送は図 4.3 の②か、③と④、図 4.4 の①と②か、③の繰り返しとなる。

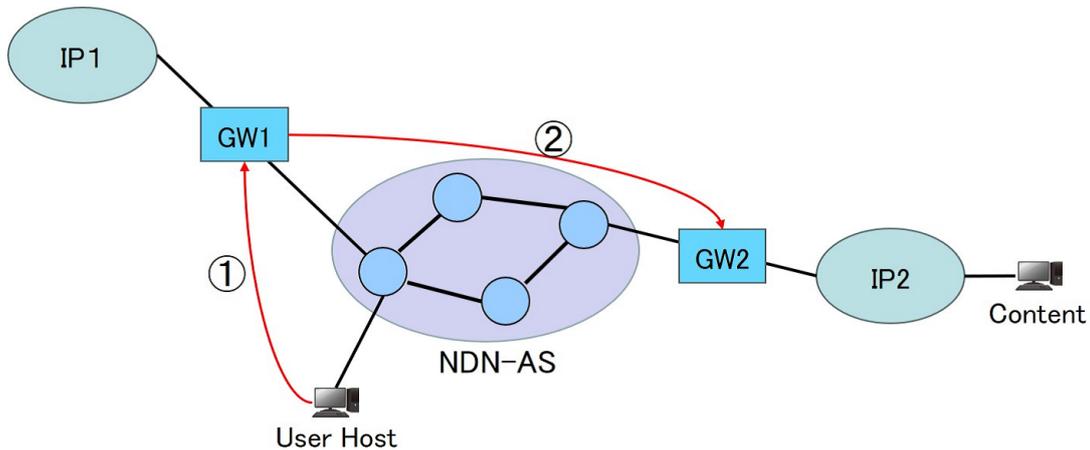


図 4.5: Packet Transfer between NDN-AS across IP-AS

また、ユーザホストが NDN-AS に解決不可能 Interest を転送しその Interest が GW に転送された時に、解決不可能 Interest は最も近いパケット変換 GW に転送されるので、図 4.5 のように、本来転送されるべきであった GW とは違う GW に転送される状態が発生する可能性が存在する。

このような場合、最初に Interest が転送された GW1 は、DNS サーバで名前解決を行う。この時、図 4.5 の場合だと GW2 の IP アドレスが取得されるので Interest を NDN-AS に返送し、GW2 に転送する必要があると分かる (①)。

GW1 は GW2 に対して新たなユーザホストとしてふるまい、GW2 に対して各パケット変換 GW の個別の識別名をパケットのヘッダに用いて、INCT 操作 Interest を転送する (②)。Data パケットをユーザホストのもとに転送するときは、GW2 で NDN-Data パケットに変換された Data パケットは PIT に従って転送することにより GW1 に到達する。その後、GW1 は改めて NDN-Data パケットをユーザホストのもとに転送する。

## 第5章 まとめ

本稿ではIP-ASとNDN-ASが混在している環境で発生する、IP-ASとNDN-ASを単純に接続しただけでは異種のAS間でパケットの転送を行うことができないという問題に対して、先行研究での課題を踏まえて異なる種類のネットワークを経由したパケット転送を行う方法の提案を行った。提案手法ではIP-NDN間での通信を実現するため、事前処理とパケット転送処理という2部構成で名前解決とパケット転送の処理を提案し、異種のネットワーク間でのパケット転送を行うアーキテクチャの概要を示した。

今後は1つのASに対して3つ以上のASが接続し、パケットの転送経路が枝分かれする場合のパケット転送法について検討する予定である。また、提案アーキテクチャをP4[4]を用いて実装し、パケット変換にかかる遅延時間等を含む性能についての数値評価を行う予定である。

## 謝辞

本研究を行うに当たり，ご指導を頂いた上山教授に感謝します。また日常，有益な議論をして頂いた研究室の皆様にも感謝します。

## 参考文献

- [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] Yakov Rekhter, Susan Hares, and Tony Li. 2006. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 4271. RFC Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC4271> <http://www.rfceditor.org/rfc/rfc4271.txt>.
- [3] 上山憲昭 “情報指向ネットワークの最新動向 [1] — ICN の仕組みと実用化に向けた課題—”, 電子情報通信学会 会誌 2021 年 3 月号, 2021 年 3 月
- [4] Pat Bosshart, Dan Daly, Glen Gibb, Martin Izzard, Nick McKeown, Jennifer Rexford, Cole Schlesinger, Dan Talayco, Amin Vahdat, George Varghese, and David Walker. 2014. P4: Programming protocol-independent packet processors. “P4: Programming protocol-independent packet processors,” *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 44, no. 3, pp. 87–95, Jul. 2014.

## 学会発表リスト

- 田中晃平, 上山憲昭, “IP と NDN 間のパケット転送のための名前解決とパケット転送法”, 電子情報通信学会, 第 24 回 ICN 研究会ワークショップ, 福岡, 2023 年 8 月
- 田中晃平, 上山憲昭, “IP/NDN 間の名前解決とパケット転送法“, 電子情報通信学会 2023 年ソサイエティ大会, B-6-8, 名古屋, 2023 年 9 月
- 田中晃平, 上山憲昭, “2 つ以上の GW を介した IP/NDN 間の名前解決とパケット転送法”, 電子情報通信学会 2024 年総合大会, B-14, 広島, 2024 年 3 月