

# NDN 環境下における Interest パケットの周期操作によるキャッシュ効率化

平井 匠<sup>†</sup> 中里 秀則<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 早稲田大学基幹理工学研究科情報理工・情報通信専攻 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: †tkm\_4\_dream@ruri.waseda.jp, nakazato@waseda.jp

あらまし 近年、ネットワークの利用目的が変わってきている。そこで、今までの IP ネットワークではなくコンテンツ指向 (ICN) のネットワークモデルの研究が進められている。また、現在の特徴的なネットワークの利用方法として、動画や音楽のストリーミング配信が多くなってきている。本研究では、現在のネットワーク利用状況を想定して、ICN に則ったアーキテクチャである NDN 環境下において、限定的なアクセスの状況下で Interest パケットを操作することでコンテンツのライフタイムを長くするモデルを提案した。一定のアクセス頻度でコンシューマがコンテンツをリクエストする状況に対して 1.1 倍のキャッシュリプレイスメント効率化を実現した。

キーワード NDN, ICN, キャッシュ, パケット操作

## Cache Efficiency Improvement by Periodic Operation of Interest Packets in NDN

Takumi HIRAI<sup>†</sup> and Hidenori NAKAZATO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Waseda University Okubo 3-4-1, Shinjyuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan

E-mail: †tkm\_4\_dream@ruri.waseda.jp, nakazato@waseda.jp

**Abstract** The purpose of using networks in recent years has changed. Therefore, research on content-oriented (ICN) network models instead of IP networks has been underway. In addition, streaming distribution of moving images and music is increasing as a typical usage of networks at present. In this study, assuming the current network usage situation, we propose a model that prolongs the lifetime of cached content in Named Data Networking (NDN) which is an incarnation of ICN by manipulating content request interval. The cache replacement efficiency has been improved 1.1 times when consumers request content at a certain access frequency.

**Key words** NDN, ICN, cache, Packet manipulation

### 1. ま え が き

近年、インターネットの利用形態は移動体通信の普及に伴い、特定の相手と接続する通信形態から、コンテンツの取得を目的とした通信が主となってきている。ネットワークのトラフィック量を占めている通信方式の 1 つに、ストリーミング配信が挙げられる。音楽や動画を端末に保存することなくダウンロードしながら再生をする技術であり、ストリーミング配信の中でもライブストリーミングなど新たな技術も展開されている。

しかし、現在用いているネットワークはロケーション指向型の通信である IP ネットワークであり、この基本技術に加えて付け焼き刃で機能拡張を続けているため、すでに使わない機能を持ち続けていたり、利用想定に最適とは言い難いと言える。そこで、現在コンテンツ取得に対応した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 (Information Centric

Networking: ICN) [4] [2] [6] の開発が進められている。

ICN が持つ大きな特徴として、コンテンツの名前を用いたルーティングとネットワーク内でのキャッシングの 2 つが挙げられる。ICN では、既存で用いられている IP 通信のネットワークアドレスのようなロケーション情報ではなく、コンテンツに割り当てられる名前を参照して通信が行われる。コンシューマは必要なコンテンツの名前を要求し、ルータはその名前に基づいてルーティングを行う。また、ルータはコンテンツが上位ノードから運ばれてくる際、コンテンツのキャッシュをしており、要求されたコンテンツがルータにキャッシュされていた場合、上位ノードに要求パケットをフォワーディングせず、そのルータにキャッシュされているコンテンツを下位ノードやコンシューマに送り返す。

ICN には既存研究が複数存在しており、分散型アーキテクチャと集中型アーキテクチャの 2 つに分けることが出来る。

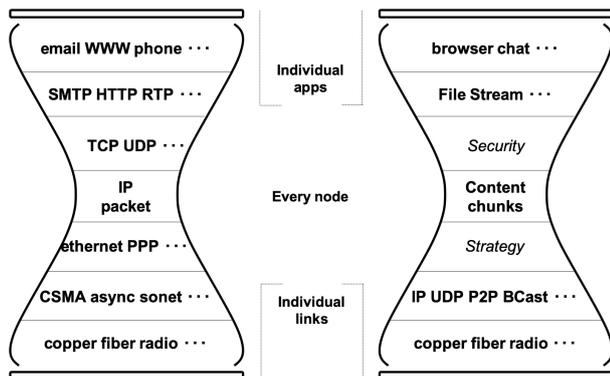


図1 IP ネットワークと NDN のアーキテクチャ

分散型アーキテクチャの代表例としては、米国のプロジェクトである NDN (Named Data Networking) [1] が挙げられる。NDN アーキテクチャは、IP アドレスの代わりにコンテンツの名前を用いる。本研究では、ICN 研究事例の多い NDN アーキテクチャを研究対象とする。NDN が抱えている問題の一つに、コストと QoS の関係がある。ルータにキャッシュ機能を与えることはすでに可能となっているが、今すぐにネットワークを ICN に移行するとなると実現には多大な設置コストがかかるという問題がある。そのため、設置コストを落とすためにキャッシュを効率的に利用することが優先課題として上がっている。また、NDN は仕組み上、コンテンツの位置独立性が担保されているため、網内キャッシングを行うためキャッシングポリシーが性能に大きく影響する。文献 [3] では、ネットワークの構造上、コンシューマに近いエッジルータにキャッシュが集中し、ネットワーク全体でキャッシュを行うメリットは少ないと述べている。そこで、本研究ではエッジルータでのキャッシュ置換を減少させるための手法について述べる。

本稿は第 2, 3 章で関連研究について、第 4 章で提案手法について述べ、第 5 章で結びとする。

## 2. NDN

### 2.0.1 NDN の概念

今日のインターネットは図 1 のような砂時計モデルとなっており、グローバルな相互接続のための必要最低限の機能を実装した IP レイヤーを中心として展開されている。従来の IP ネットワークはコミュニケーションを目的とするネットワークとしてデザインされたため、通信端末の位置情報を表す IP アドレスに基づいて通信が行われる。

この通信方式に対し、NDN は通信単位を位置情報ではなく、より一般的なオブジェクト名とする。NDN ではパケットに対して、端末の名前や動画のデータチャンクの名前、更にはドアを開けるといった指示にまでコンテンツ名を与えることが可能となる。

このように、NDN が持つ最大の特徴・概念は、様々な目的に合わせたパケットに名付けられたコンテンツ名を通信単位とし、コンテンツ名に基づいて通信を行うことである。そのため NDN の概念は、コンテンツを求めるために通信の送受が行われ

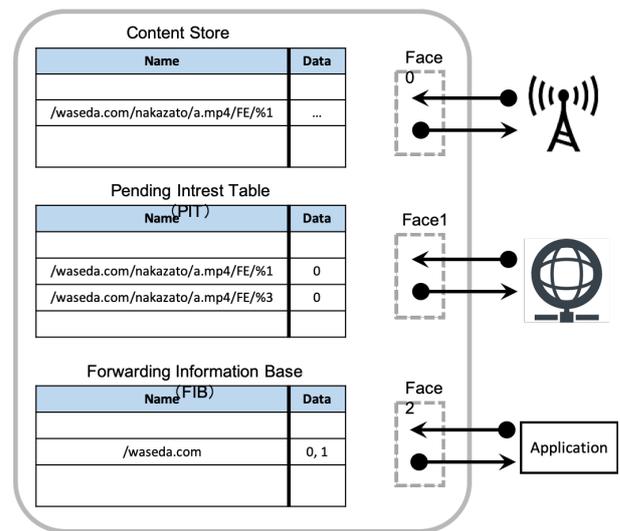


図2 NDN ルータのデータ構造

ており、インターネットトラフィックの大半を占めている現在のインターネットの利用状況に対し、非常に適したものになっている。

### 2.1 NDN アーキテクチャ

NDN はデータ (コンテンツ) を要求するコンシューマ、コンシューマからの要求に応じたコンテンツを提供するプロデューサ、そしてコンシューマとプロデューサの伝達方向管理及び、最適なルートを決定する補助をする役割を担っているルータによって構成されている。NDN では、通信をする際に IP 通信で用いられている位置情報を参照する IP アドレスの代わりにコンテンツ名 (コンテンツ識別子) を参照して通信を行う。また、通信時に情報を運ぶ役割であるパケットには Interest パケットと Data パケットの 2 種類が存在する。そして、IP 通信におけるインターフェイスのことを NDN では Face と呼ぶ。以下では、NDN におけるコンテンツ名、パケット、NDN ルータのデータ構造、そして NDN でのルータにおける Interest パケットと Data パケットの処理を説明する。

### 2.2 NDN のパケット

NDN では Interest パケットと Data パケットの 2 種類を用いて通信が行われる。Interest パケットには要求するコンテンツ名の情報が搭載されており、Data パケットにはコンテンツ名とデータが与えられている。

NDN は pull 型の通信モデルであり、コンシューマが要求するコンテンツを識別するための名前を搭載した Interest パケットをネットワークに送り出すことで通信が始まる。その後、通信を経て Interest パケットが要求するコンテンツを保持する Data パケットがサーバもしくはルータからコンシューマに向けて送られる。

### 2.3 NDN ルータのデータ構造

NDN におけるルータではフォワーディング機能を果たすために、Pending Interest Table (PIT)、Forwarding Information Base (FIB)、Content Store (CS) と呼ばれる 3 つのデータ構造を保持している。(図 2)

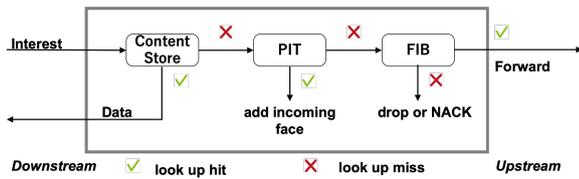


図3 Interest パケットのフォワーディングプロセス

## 2.4 CS (Content Store)

CS は NDN が持つ最大の特徴であるキャッシュ機能を実現するデータ構造である。NDN ルータは、Data パケットが送られてきた後に、キャッシングポリシーに従ってデータをキャッシュするかどうかを判断する。データをキャッシュすると判断した際に CS のストレージが残っていなかった場合、既存のデータからリプレースメントポリシーに従って選択されたデータが破棄され、新しいデータをキャッシュする。

## 2.5 PIT (Pending Interest Table)

PIT は Interest パケットを送り出したコンシューマの元に Data パケットを送り返すためのデータ構造である。各 NDN ルータの PIT では下位ノードから送られてきた全ての Interest パケットのコンテンツ名に対する、送り元が記載されている。

## 2.6 FIB (Forwarding Information Base)

FIB は Interest パケットをそのコンテンツ名に該当するデータを保持するプロデューサまで転送するためのデータ構造である。IP ネットワークにおけるルーティングテーブルにあたる部分である。NDN では Interest パケットのコンテンツ名に基づいてフォワーディングを行うため、FIB にはコンテンツ名の Prefix とそのコンテンツを保持するプロデューサに向かうための Face が記録されている。

## 2.7 パケットのフォワーディングプロセス

### 2.7.1 Interest パケット

Interest パケットの NDN ルータの中での一連の流れを図 3 に示す。

Interest パケットが NDN ルータに届いたら、まず Interest パケットに搭載されたコンテンツ名に該当するデータが CS にキャッシュされているかを検索する。CS 内に要求するデータが存在する場合、NDN ルータは上位ノードに Interest パケットを回すことなく、該当する Data パケットを Face に記載された下位ノードに向けて送り返す。この際に到着した Interest パケットは破棄する。

一方、CS 内に要求するデータが存在しない場合、次に PIT に Interest パケットのコンテンツ名に該当するエントリーがあるかを検索する。PIT に該当するエントリーが存在する場合、Interest パケットは上位ノードに送らずに、PIT エントリーに Face を追加する。

PIT に該当するエントリーが存在しない場合、PIT に新しいエントリーを作成し、そのコンテンツ名と送られてきた Face を記録し、FIB を参照して Interest パケットを送る上位ノードを決定する。

FIB に Interest パケットが持つコンテンツ名の Prefix に該

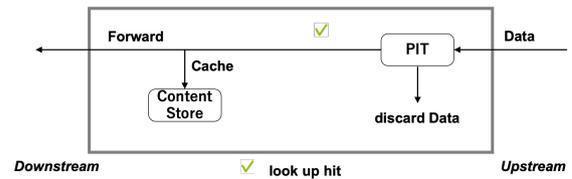


図4 Data パケットのフォワーディングプロセス

当するエントリーが存在する場合は、追従するようにそのエントリーに記録された Face に Interest パケットを送り届ける。FIB エントリーが存在しない場合、その Interest パケットを破棄する、もしくは Nack を送り返す。

### 2.7.2 Data パケット

Data パケットの NDN ルータ内での一連の流れを図 4 に示す。

Interest パケットに対応するコンテンツがキャッシュされるノードにて、Data パケットが作られ、下位ノードに向けて発信されます。上位ノードから送られてきた Data パケットが NDN ルータに到着後、まず PIT に Data パケットのコンテンツ名と一致する PIT エントリーが記録されているかを検索する一致する PIT エントリーが存在する場合、PIT エントリーに記載されている Interest パケットを送ってきた全ての Face に向けて Data パケットを送り返す。このとき、NDN ルータはキャッシングポリシーに従って Data パケットを CS にキャッシュする。

## 3. キャッシングポリシー

### 3.1 LRU (Least Recently Used)

LRU はあるルータにおいて、キャッシュがすでに飽和している上で新しく到着したコンテンツをキャッシュする際に、現在キャッシュされているデータの中で参照されていない時間が最も長いキャッシュを捨ててデータを置換する方式である。

参照の局所性を備えたアクセスに強いため、ストリーミング配信等に適している。一方、低オーバーヘッドに実装することが困難である。なお、本論文では LRU を研究対象としている。

### 3.2 LCE (Leave Copy Everywhere)

LCE はキャッシュデシジョンポリシーの 1 つである。キャッシュデシジョンポリシーとは、CS にコンテンツが到着した際にコンテンツをキャッシュするか否かを決定するための指標である。LCE は、コンテンツ転送時における経路として利用した全てのルータでキャッシュを行う。経路上に全てコピーされるため、アクセスの集中するノードではキャッシュの置き換えが多発し、キャッシュヒット率が低下する可能性がある。本論文では、キャッシュデシジョンポリシーに LCE を用いて実験を評価する。

## 4. 提案手法

### 4.1 Interest パケット送信

文献 [3] でも述べられているように、NDN のような分散型ネットワークでは一般的にエッジルータのキャッシュリプレースメントが最も多くなるとの結果が報告されている。一方で、

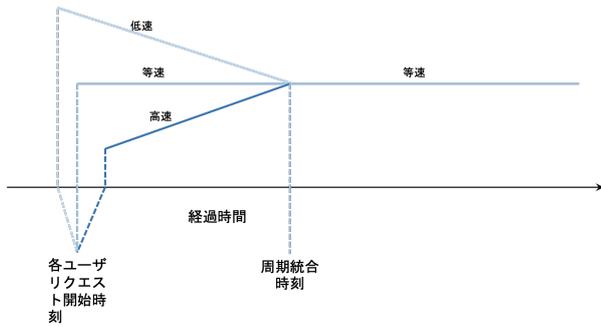


図5 提案手法で期待される速度変化

既存研究ではキャッシュロケーションやキャッシュデシジョンポリシー、キャッシュリプレイスメントポリシーに関する報告 [7] [6] [5] は多くあるが、パケットの周期変更を切り口としたキャッシュ破棄を目的とする論文は報告されていない。

そこで、本研究ではエッジノード-コンシューマ間でコンシューマ間でパケットの送信周期を変更する。コンシューマから発信される Interest パケットの周期を変化させる上で、変化倍率を高速・等速・低速の3種類に設定する。最終的に Interest パケットは図5のように揃って送られる形を理想とする。

上記の仕組みを実現することで、また、エッジノードへの Data パケットの到着数が減少することから、キャッシュ置換の回数が減少することが期待できる。ひいては、同じコンテンツが CS にキャッシュされる回数を減らすことを可能とする。

#### 4.2 グループ化

本論文で提案する、下位ノードとコンシューマ間の通信で Interest パケットの送信周期を揃える手法では、Data パケットに速度情報を載せることで、同じコンテンツを要求する Interest パケットを1つのグループとしてまとめあげる方法を用いる。まとめあげる上で、そのグループに所属する Interest パケットの先頭の時刻からグループに属すかどうかの範囲の時刻をこちらで設定する。この範囲に当たる時間幅を以降「グループ化閾値」と呼ぶ。グループ化を必要と考える理由は2点ある。1点目は、コンテンツの長さが限定された場合に時間がいくら経過しても最終的に周期が揃わないことから、効率化が果たされない可能性があるためだ。2点目は、ユーザ数に際限がない場合、どのユーザが高速にすべきでどのユーザが低速にすべきかの指標が作りにくいから。グループ化を用いることで、周期を変化させる上で一般解を仮置きさせることができ、コンテンツのキャッシュ回数減少の最低限の役目を果たすと考えた。

そこで、ある時間の範囲に到着する同じコンテンツを要求する Interest パケットを1つのグループとして認識をする。その上で Interest パケットを送るよう最初に指示してきたコンシューマ (Face) に対して、その連続するコンテンツの次の要求からは指示を遅くするよう命令をする。この仕様を導入する上で、コンシューマを認識・記憶する必要がある。しかし、コンテンツ指向型である NDN は、送られてきた方向に Data パケットを送り返すという機能しか持ち合わせておらず、誰が送ってきたかというネットワーク上の位置情報を持っていない。その

ため、研究が進められているコンテンツ指向型のネットワークの中に概念的にどのコンシューマをグループに所属しているのかを識別する仕組みを作るべく、本研究ではコンシューマが操作の信号を受けたら周期を変更して次の Interest パケットを送るという仕組みにし、その信号を Data パケットの Tag に搭載することとした。なお、この Tag とは、Data パケットが有するコンテンツ情報とは別に、付随した情報を載せることが出来るフィールドに載せた命令を指している。

今回のネットワークを想定したモデルを図6に示す。図6では、コンシューマ1とコンシューマ2が1つ目のグループに属し、コンシューマ3とコンシューマ4が2つ目のグループに属する場合のモデルである。コンシューマ1とコンシューマ2および、コンシューマ3とコンシューマ4はエッジノードに向けて最終的に Interest パケットが同じタイミングで送られるように動作をする。

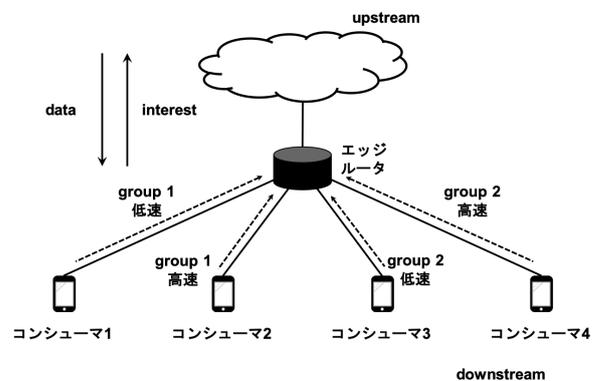


図6 グループ化を想定したネットワークモデル

#### 4.3 実装方法

提案手法の仕組みを実装するために、ルータ側からコンシューマにリクエストタイミングの操作を指示させる信号を送る。そのために、Data パケットに新たな Tag をつける。この Tag にはコンシューマが Interest パケットを送る際の周期を指示するための値を載せる。Tag に任意の値を載せるタイミングは、Data パケットが下位ノードに送信される時である。周期の倍率は slow, normal, fast の3段階で設定する。図7に提案手法時における Data パケットが NDN ルータからコンシューマに送られるまでのフローを示す。

コンシューマが受け取った際に Tag を判別し、その Tag に載せられた指示に合わせてコンシューマが次の Interest パケットを送る周期を意図的に変更する。この際の周期倍率は、人間が動画視聴時にずれていても違和感を覚えないと言われている、誤差 3% になるべく近い値かつ、キャッシュの効率化が実際に観測できるように、slow および fast の倍率をそれぞれ 0.95 倍、1.05 倍とする。

図8にグループ作成およびグループ判断の基準について示す。

グループに所属していない Data パケットがその時刻を起点にグループ化閾値との和までを1つのグループとし、それ以降に送信される Data パケットはそのグループに所属しているか

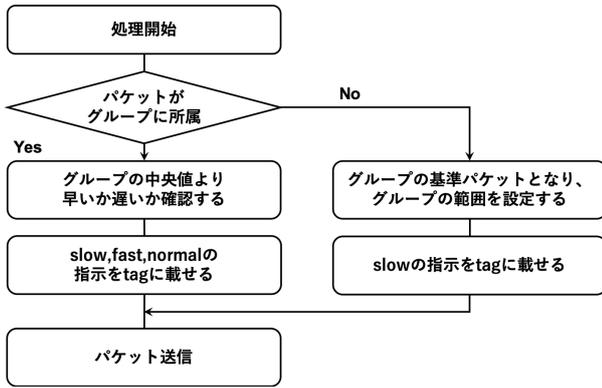


図 7 Data パケットが NDN ルータからコンシューマに送られるまでのフロー

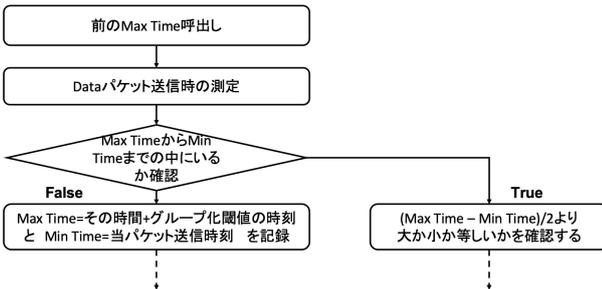


図 8 パケットがグループにいるか判断するアルゴリズム詳細

を確認し、閾値に入っていれば閾値の中央値より早い遅いかの指示を与え、入っていない場合、再びその Data パケットが送信される時刻を起点に新しいグループを作成する。

今回使用するグループ化閾値は、使用するリプレースメントポリシーである LRU の特徴を踏まえて、コンテンツが CS にキャッシュされてから破棄がされるまでの時間をコンシューマ間の送信レートに、実際に生じるグループ数の数の合計時間とデータ取得までにかかる往復の通信時間をグループの閾値とした。

## 5. シミュレーション

### 5.1 シミュレーション環境

速度の倍率を上記に設定する上で、最も利用が増えているストリーミングを想定した。一般的に人間が動画を視聴する上で違和感を覚える倍率は± 3%という研究結果 [8] があり、違和感を覚えない程度での周期操作であればどのようなコンテンツも問題がないと考え、今回は誤差 5%と設定した。5.2 では単一ルータ時の動作を確認・評価をし、5.3 では複数ルータ時のキャッシュ効率に関して評価をする。表 1 に実験のシミュレーション環境を示す。

### 5.2 単一ルータ型

コンシューマが 4 個、ルータとプロデューサが 1 個ずつの単一ルータ型のモデルについて考える。図 9 に各コンシューマの Interest パケット送信時刻を、図 10 に通常時と提案手法のキャッシュリプレースメント時刻の遷移について示す。

図 9 を参照すると、Interest パケットの送信時刻が収束して

条件	単一ルータ	ツリー構造
シミュレータ	ndnSIM 2.0	
キャッシングポリシー	CEE	
リプレースメントポリシー	LRU	
コンシューマ数 (パケット)	4	40
ルータ数 (個)	1	7
プロデューサ数 (個)	1	
パケット送信レート (パケット/s・個)	100	
パケット送信開始間隔 (s)	0.25	
グループ化閾値 (s)	0.54	
周期倍率 (倍)	0.95, 1.00, 1.05	

表 1 シミュレーション環境

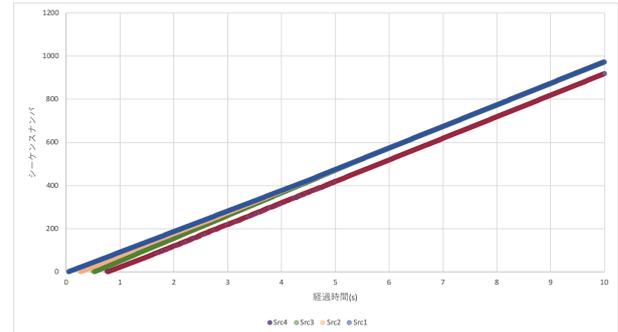


図 9 各コンシューマの packet 送信時刻

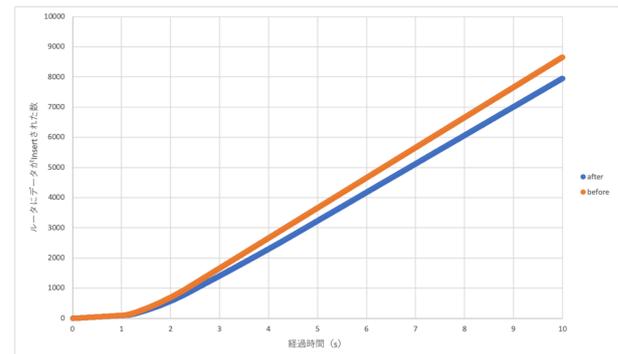


図 10 単一ルータにおけるキャッシュリプレースメント時刻

いくのがわかる。また、コンシューマ間の送信間隔が 0.25 であることから 3 個のコンシューマが統一され、1 個のみグループから外れていることがわかる。よって、正しい挙動を示している。また、図 10 を参照すると提案手法の方がリプレースメント数が 1.1 倍ほど少なくなる結果となった。

### 5.3 ツリー構造型

先ほど用いたルータを配置し、ルータを 7 個使ったツリー構造型のモデルについて考える。モデルのイメージを図 11 に、各階層のキャッシュリプレースメント数を図 12 に示す。

図 12 を参照すると、第 3 層および第 1 層ではおよそ 1.1 倍のキャッシュ置換効率化が達成された。また、第 2 層では 1.03 倍のキャッシュ置換効率化が見られた。

### 5.4 考察・課題

単一ルータ型に関しては、キャッシュリプレースメント回数が 1.1 倍向上した。この結果から、エッジノードで周期を統一

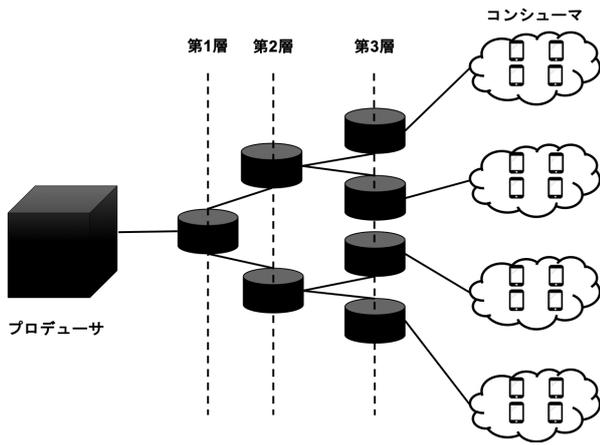


図 11 ツリー構造型のネットワークモデル

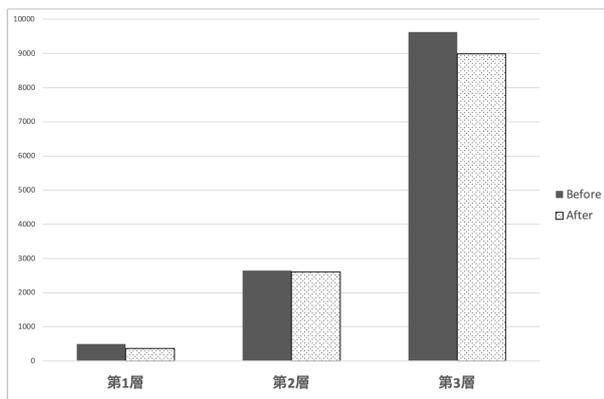


図 12 各階層のキャッシュリプレイスメント数

させることで PIT と CS の効率化が実現されたと予見される。また、ツリー構造型では第 1,3 層は効率化の度合いが大きいことがわかる。一方で、第 2 層ではキャッシュ置換の改善度合いが低い。これは、キャッシュ置換のボトルネックが第 1 層から第 2 層に移動したからだと考える。

今後の課題として、今回のグループ化における閾値は静的に決定したので、人気度 Zipf などを用いた動的な決定方法を導入する必要があることが考えられる。また、現在は単純なネットワークのみ用いているので、より複雑なネットワークを検討する必要がある。

## 6. む す び

本論文では、Interest パケットの周期操作によるキャッシュリプレイスメントの効率化に関して説明した。NDN が持つ機能およびその課題に対して、既存研究にはないコンシューマ側での指示を加える手法を用い、単一型ネットワークモデルおよびツリー構造型ネットワークモデルでキャッシュリプレイスメントがそれぞれ改善されたことを確認した。一方で、現在は基準の時間をこちらで固定値として与えてしまったため、最大限の機能を発揮できていないように考える。今後はコンテンツの人気度に依存させた周期調整に関する範囲を動的に決定する仕組みを搭載して結果を測りたい。

- [1] Ndn project overview - named data networking (ndn). <https://named-data.net/project/>. (Accessed on 11/25/2019).
- [2] Gwendal Simon Athanasios V. Vasilakos, Zhe Li and Wei You. Information centric network: Research challenges and opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 52, pp. 1–10, 2015.
- [3] Seyed Kaveh Fayazbakhsh. Less pain, most of the gain: Incrementally deployable icn. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review.*, Vol. 43, No. 4, 2013.
- [4] V. A. Siris N. Fotiou C. Tsilopoulos X. Vasilakos K. V. Katsaros G. Xylomenos, C. N. Ververidis and G. C. Polyzos. A survey of information-centric networking research. *Communications Surveys Tutorials*, Vol. 16, pp. 1024–1049, 2014.
- [5] Yang ZHANG Chen MEI Huan WANG Janping WU, Mign LING. Dynamic allocation of spm based on time-slotted cache conflict graph for system optimization. *IEICE TRANS. INF. & SYST.*, Vol. E95-D, No. 8.
- [6] F. R. Yu J. Liu T. Huang Q. Chen, R. Xie and Y. Liu. Transport control strategies in named data networking: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, No. 3, pp. 2052–2083.
- [7] Hemant Kumar Rath Bighnaraj Panigrahi Anantha Simha Samar Shailendra, Senthilmurugan Sengottuvelan. Performance evaluation of caching policies in ndn - an icn architecture. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) — Proceedings of the International Conference, 2016.
- [8] 川喜田 裕之半田 拓也. 映像音声と振動との定時時間差の許容範囲およびリアリティの評価. 2015 年映像情報メディア学会年次大会, Vol. 22C-2, , 2015.