

令和4年度 春学期 卒業研究3 (BI)  
学士論文

題目 NDN ルータの複数の目的を考  
慮したコンテンツ配置制御

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 26001902775

橋本紘輝

令和5年1月31日

# 概要

デジタルコンテンツやIoT データを効率的に配信できる新しいネットワークアーキテクチャとして、情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) が大きな注目を集めている。しかし多くの場合、コンテンツの名称は場所に依存しないため、ICN ルータの転送テーブル (FIB: forwarding information base) のエントリ集約は困難である。名前が同一の文字列を含む場合は少数の FIB エントリに集約可能なため、エントリを効果的に集約するには、似たような名称のコンテンツが同一ノードに存在することが望ましい。一方、インターネットでは CDN (content delivery network) が、ユーザの配信品質を向上しネットワーク内のトラフィック量を削減する技術として広く用いられているが、CDN のこれらの目的は ICN により達成される。

本稿では、CDN を ICN のオリジナル提供プラットフォームとして位置づけ、URL の最初のコンポーネントである TLD (top level domain) と URL の 2 番目のコンポーネントである SLD (second level domain) の各々に対し、該当 Web オブジェクトの個数の降順に同一の CDN のキャッシュサーバに割り当て、Web オブジェクトを再配置することで、ICN ルータの FIB のサイズを効果的に削減する。

コンテンツ配置はネットワークを流れるトラフィック量や配信フロー長に大きな影響を与えるが、[12] では FIB のエントリサイズのみには言及していない。そこで本論文では [12] を拡張し、平均リンク負荷についても考慮する。すべてのノードにコンテンツを配置することを想定し、平均 FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低減できるコンテンツ配置方式を提案する。また、配置ノードを少数に限定することで、平均 FIB サイズのさらなる低減が期待される。そこで、配置ノード数を限定したときの平均 FIB サイズ、平均リンク負荷、リンク負荷の変動係数、コンテンツ可用性の 4 つの評価尺度を考慮したコンテンツ配置ノードの設計を提案する。複数種類のトポロジを用いた数値評価により、トポロジや尺度の評価重みが、最適な配置ノード数に与える影響も明らかにし、平均次数によって分類したトポロジタイプにおいて、異なる配置ノード数で最適になることを示す。

# 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 LPMを使用したFIB集約法	5
2.2 オブジェクト数優先配置法	6
<b>第3章 平均リンク負荷を考慮したFIB集約法</b>	<b>7</b>
3.1 要求比率優先配置	7
3.2 性能評価条件	7
3.3 性能評価	8
<b>第4章 コンテンツ配置ノード数設計法</b>	<b>10</b>
4.1 コンテンツ配置方式	10
4.2 最適配置ノード数の設計	10
<b>第5章 性能評価</b>	<b>11</b>
5.1 評価条件	11
5.2 性能評価	11
<b>第6章 まとめ</b>	<b>17</b>
謝辞	18

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

インターネットやSNSの普及により、YouTubeなどのユーザ生成コンテンツ（UGC）が増大している。また、高速・大容量・同時多接続の5G通信の普及に伴って、農業や企業の工場などではIoT（Internet of Things）の実用化が進められており、IoTデバイスから取得した膨大なセンサデータの活用にはその処理が必要である。そこで、コンテンツを効率的に配信する次世代のネットワークとしてICN（Information-Centric Networking）が注目されている。ICNではコンテンツの名称を用いて配信要求を行うため、コンテンツの配信元を特定せずに直接コンテンツを要求することが可能である。そのため、膨大な数のデータが動的に生成されるIoT通信や、データの所在が事前に分からない災害時通信において、効率的にデータ通信を行うネットワークとして注目されている。ICNの中でもNDN（Named Data Networking）が主流であり、本稿ではこれを想定する。

## 1.2 研究の目的

NDNではIPアドレスを用いた従来の通信法と同様に、FIB（Forwarding Information Base）と呼ばれる経路制御表を参照することでNH（Next Hop）にInterestを転送する。FIBではPrefixとNHの組によってエントリが作成されるが、IPルータのFIBでは転送先IPアドレス、NDNルータのFIBではコンテンツ名がPrefixとして用いられ、コンテンツ名は、PrefixとコンテンツIDから構成される。NDNのコンテンツのオリジナルはpublisherのホストに存在し、publisherはコンテンツ名のPrefixを隣接ルータに広告する[10]。Prefix広告を受信するNDNルータは、ユーザであるsubscriberから送信されたInterestが要求されたコンテンツがpublisherのホストに転送されるようにFIBを構成する。

FIBに全てのPrefixのエントリを作成した場合、FIBに必要なメモリサイズは大幅に増加する。したがって、FIBのメモリコストを削減するためには、FIBエントリの集約が不可欠である。IP通信の場合、管理団体によって国や地域ごとに一定範囲のアドレスを割り当てるため、IPアドレスには地理的な局所性が存在する。しかし、NDNの場合、同じ組織のコンテンツを提供するpublisherのホストは同じ地域に存在する傾向にあるが、組織名は地理的な局所性はない。そのため、NDNのFIBにおけるPrefixの集約は困難となる。例えばWebページをコンテンツと見なした場合、約 $10^{11}$ のコンテンツ名があり、同じ組織のPrefixを1つのPrefixに集約した後であっても、約 $10^9$ のコンテンツ名のPrefixがある[5]。異なる組織間のPrefix集約は難しく、NDNの各FIBには約 $10^9$ エントリが必要である[5]が、IPネットワークの各FIBには約 $10^5$ エントリしか必要ない。ハッシュ表

[10]に基づいたエントリ検索を行う場合、数百万の Prefix に対しても数百万メガバイトのメモリが FIB に必要であるため、SRAM を使用した FIB の実装は困難である。

インターネットにおいて、ウェブコンテンツを効率的に配信できる仕組みとして CDN (content delivery network) が使用されている。CDN ではオリジンサーバからコンテンツのコピーを取得したキャッシュサーバが代わりに配信を行うことで、距離が近いサーバからコンテンツを取得可能なため、配信品質の向上と、ネットワークトラフィック量の削減が実現可能である。NDN では、コンテンツがユーザ近くのルータでキャッシュされ、配信される可能性が高いことから、CDN の目的は NDN によって満たされる。CDN のキャッシュサーバはキャッシュされたコンテンツの Prefix をネットワークに広告すること [3] や、publisher のホストになることが可能であることから、コンテンツのコピーを CDN のキャッシュサーバに配置することで、NDN ルータの FIB エントリの低減を行った [12]。しかしコンテンツ配置はネットワークを流れるトラフィック量や配信フロー長に大きな影響を与えるが、[12] ではリンク負荷の低減は考慮していない。本稿では [12] を拡張し、平均リンク負荷についても考慮する。また、[12] ではすべてのノードにコンテンツを配置することを想定しているが、配置ノードを少数に限定することで、平均 FIB サイズの低減が期待される。そこで、平均リンク負荷の考慮に加えて、配置ノード数を限定したときの平均 FIB サイズ、平均リンク負荷、リンク負荷の変動係数、コンテンツ可用性の4つの評価尺度を考慮したコンテンツ配置ノードの設計を提案する。複数種類のトポロジを用いた数値評価により、トポロジや尺度の評価重みが、最適な配置ノード数に与える影響も明らかにする。

## 第2章 関連研究

ICN ルータの FIB エントリ数を削減する方式として、これまでに (1) 部分キャッシュ, (2) ルート集約, (3) フラッディング, (4) ブルームフィルタ, (5) LPM の 5 つの方式が提案されている。部分キャッシュでは、すべての Prefix ではなく一部の Prefix に対して FIB エントリが作成される [1][5]。[1] では DNS を使用し、エントリがルータの FIB に存在しない場合の名前解決法を提案している。到着する Interest の Prefix のエントリがルータの FIB に存在しない場合、ルータは否定応答を Subscriber に返す。そして Subscriber は DNS を用いて、要求コンテンツと同じドメインを有しルータの FIB にエントリが存在する Prefix を得て、その Prefix に対し Interest を送信する。また [5] では、ルックアンドキャッシュアプローチを提案している。つまりルータは NRS (name routing system) サーバから取得したルーティング情報をルータの FIB にキャッシュする。本アプローチでは FIB のサイズは縮小されるが、名前検索が必要となる。2 番目のアプローチであるルート集約では、すべての Interest が NAC (name collector) と呼ばれる同一のルータを通過するように FIB が設定される [8]。NAC がルートノードであるツリートポロジで NAC に向けて Interest が送信されるため、ルータで必要な FIB のサイズが削減されるが、Interest の転送ホップ長は増加する。3 番目のアプローチ、すなわちフラッディングでは、FIB 検索を行わずにルータのすべての出力面に Interest がブロードキャストされる [2] [3]。[2] ではルータで Interest をブロードキャストし、Prefix をキャッシュしている隣接ルータは、要求元ルータにルータ情報を返す。[3] では、人気のないコンテンツアイテムの Interest を転送し、FIB を使用せずに人気のあるコンテンツアイテムの Interest をブロードキャストすることを提案した。人気コンテンツのコピーは多くのルータでキャッシュされる可能性が高いため、Interest をブロードキャストすることで、要求されたコンテンツを持つルータに Interest が高い確率で届く。ただし Interest は冗長に転送されるため、ネットワークリンクが過負荷になる可能性がある。最後に 4 番目のアプローチ、つまりブルームフィルタでは、ルータが各出力フェースで提供されるブルームフィルタを使用し、到着する各 Interest を各出力フェースに転送するか否かを判断する [6][7]。ブルームフィルタを使用することで、ルータは限られた数のメモリアクセスで小さなサイズのメモリを使用して、Interest 転送の決定が可能である。ただし Interest を誤った出力面に転送する可能性があり、冗長な Interest 送信によりネットワーク負荷が増加する。

### 2.1 LPM を使用した FIB 集約法

[12] では、IP ルータで FIB のサイズを低減させるために用いる LPM (longest prefix matching) を NDN ルータに適用している。アプローチとしては (1) URL の文字の単位 (2) URL のコンポーネントのユニット、の 2 つが考えられるが、ここでは (2) を利用し

ている。コンポーネントは URL のピリオドで区切られた文字列として定義し、例えば、“www.ritsumei.ac.jp” の URL は “www”, “ritsumei”, “ac”, “jp” で構成される4つのコンポーネントである。NDNにおける FIB の Prefix は、コンポーネントで分離した後に逆順で並び替えたものを連結したもので、つまり、“jp / ac / ritsumei / www” である。URL の最初のコンポーネントは TLD であり、URL の2番目のコンポーネントは SLD とし、URL のコンポーネントは LPM の単位として使用する。

各ノード  $n$  にて、ノード  $n$  にオリジナルが割り当てられたオブジェクトを除くすべてのオブジェクトに対して FIB エントリを作成する。このアルゴリズムは各ノードで独立に実行できるため、以下では1つのノードに焦点を当てる。FIB のエントリ  $x$  の Prefix を  $p(x)$  で、 $p(x)$  の最初から  $s$  番目までのコンポーネントを  $p(x, s)$  で示す。さらにルーティングアルゴリズムによって設定される FIB エントリ  $x$  の出力ポートを  $F(x)$  とする。また、 $M$  を、未チェックの FIB エントリの集合と定義し、URL のコンポーネントの最大数を  $C$  とする。

最初に TLD を対象に FIB エントリを集約し ( $s = 1$ )、次のステップでは TLD と SLD の組に対し FIB エントリを集約する ( $s = 2$ )。すべてのコンポーネントの位置  $1, 2, \dots, C - 1$  での集約が各々、完了するまで本手順が繰り返される。この方法は FIB エントリを逆方向、すなわち  $s = C - 1$  から  $s = 1$  の順に集約することも可能である。

## 2.2 オブジェクト数優先配置法

[12] では、Web オブジェクトの TLD や SLD に着目し、該当オブジェクトの上位から順にノードの位置を考慮せずに配置をしている。さらに、負荷の集中を避けるため、各ノードにオブジェクトの上限値数を設けることで、全ノードにできるだけ均等にオブジェクトを配置している。この方式でコンテンツをオリジナルの位置に配置したときと比べて約45%程度集約できることを示している。

## 第3章 平均リンク負荷を考慮したFIB集約法

既存研究ではノードの位置を考慮せずオブジェクト数の降順にコンテンツの配置を行った。そこで本節ではコンテンツの配置場所と配置順を変更することでFIBサイズと平均リンク負荷を同時に低下させるコンテンツ配置方式を提案する。

### 3.1 要求比率優先配置

提案方式では、ネットワークの中心から高人気コンテンツを配置する。つまり、要求比率が高いドメイン名を他のノードに至るホップ長の平均値が小さいノードから優先して割り当てる。その時、TLDやSLDが同じオブジェクトを同一のノードに配置することでFIBサイズと平均リンク負荷を同時に低減させることが可能となる。以下ではその詳細を説明する。

使用URLの合計要求比率の降順でTLDをソートし、 $D_1(x)$ を $x$ 番目にランクされたTLDと定義する。同様に各TLDに対し、合計要求比率の降順でSLDの組をソートし、 $D_2(s, y)$ をTLDが $s$ で $y$ 番目にランクされたSLDと定義する。 $M_1$ を異なるTLDの数、 $M_2(s)$ をTLDsを有する異なるSLDの数と定義する。 $U_1(x)$ はTLDとして $D_1(x)$ を持つURLの集合を示し、 $U_2(s, x)$ はTLDとして $s$ を、SLDとして $D_2(s, x)$ を有するURLの集合を示す。さらに $m_1(x)$ と $m_2(s, x)$ を、 $U_1(x)$ と $U_2(s, x)$ に含まれるURLの数として、 $r_1(x)$ と $r_2(s, x)$ を $U_1(x)$ と $U_2(s, x)$ に含まれるURLの要求比率の総和として定義する。

$A_n$ はノード $n$ に配置できるURLの数を示す。ノード $ij$ 間の最短ホップ長を $h_{ij}$ 、ノード $n$ の人口比を $r_n$ としたとき、 $\sum r_n h_{xn}$ によりノード $x$ から他の全てのノードに至る平均ホップ長 $u_x$ が求められる。 $u_x$ が最小であるノードを $n^*$ とする。

$r_1(x)$ の降順に、 $x$ を選択し、 $m_1(x) \leq A_{n^*}$ の場合にはノード $n^*$ に $U_1(x)$ を割り当て、 $m_1(x) > A_{n^*}$ の場合には $U_1(x)$ を $y = 1, 2, \dots, M_2(D_1(x))$ として $U_2(D_1(x), y)$ に分割し、 $U_2(D_1(x), y)$ を $r_2(D_1(x), y)$ の降順にノード $n^*$ へ割り当てる。割り当て中に $A_{n^*}$ が上限値 $B$ を超える時、再計算を行い、 $m_2(s, y) \leq A_{n^*}$ を満たすノード $n^*$ を選択し、割り当てる。その結果、 $s_n$ がノード $n$ に配置されたURLの数であるとき、 $s_n \leq B$ を満たしながら、ネットワーク負荷低減と各ノードのFIBエントリの効果的な集約が期待できる。

### 3.2 性能評価条件

数値評価として米国のバックボーンネットワークである図3.1に示すInternet2のトポロジを利用した[13]。ネットワークすべてのノードにCDNのキャッシュサーバが提供されている状態を想定し、各ノードに上限値 $B$ を設けることで割り当てるオブジェクト数の均等化を考えた。 $B$ を $W/N \cdot 1.01 = 1010$ 個とし、 $N$ はノード数12を示す。2017年11月

に Alexa の Web ページで公開されているアクセス数上位の 8,000 の Web ページ [3] を閲覧したときに、アクセスされたオブジェクトサーバの URL を取得し、CDN を用いて配信されたものを除き、さらに米国内に配信サーバが存在する 12,010 個の URL を対象に評価を行う [1].

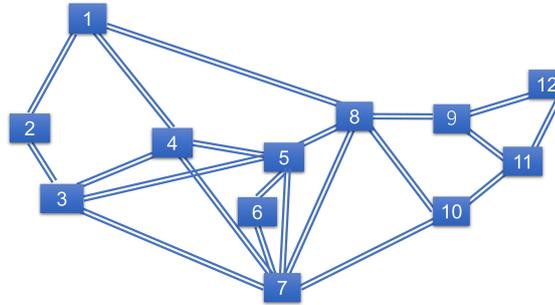


図 3.1: Internet2

### 3.3 性能評価

平均 FIB サイズ、平均リンク負荷の 2 つの評価尺度の観点から性能評価する。コンテンツ要求先ノード  $s$  の要求比率を  $D(s)$ 、要求元ノード  $d$  の人口比率を  $p(d)$  としたとき、リンク  $l$  を経由するフローの集合を  $F_l$ 、ノード  $sd$  間のフローを  $f_{sd}$  とすると、 $l$  のリンク負荷は  $\sum_{f_{sd} \in F_l} D(s)p(d)$  で求められる。全リンクにおける負荷の合計値をリンク数  $M$  で除した平均リンク負荷を  $L$  とする。ただし、ノード間リンクは双方向で考慮するものとし、リンク数  $M$  は 42 である。

図 3.1 に FIB サイズの平均値  $S$  を示す。要求比率配置 (Request) はオリジナル配置 (Original) と比較すると約 2 割の削減ができた。

図 3.2 に平均リンク負荷  $L$  を比較した結果を示す。要求比率配置は要求度が高い URL をホップ長の平均値が小さいノードに優先して配置したことで、周辺ノードにおけるリンク負荷を抑えることができ、オリジナル配置と比べて約 2 割の  $L$  を削減できた。

したがって要求比率優先配置方式は平均 FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低下させることが可能である。

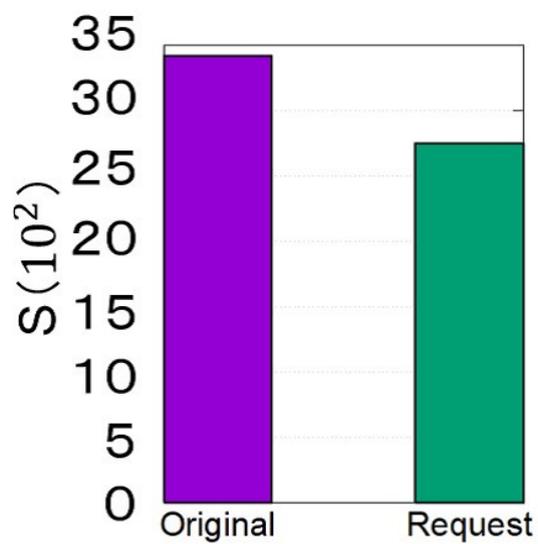


図 3.2: FIB Average Size

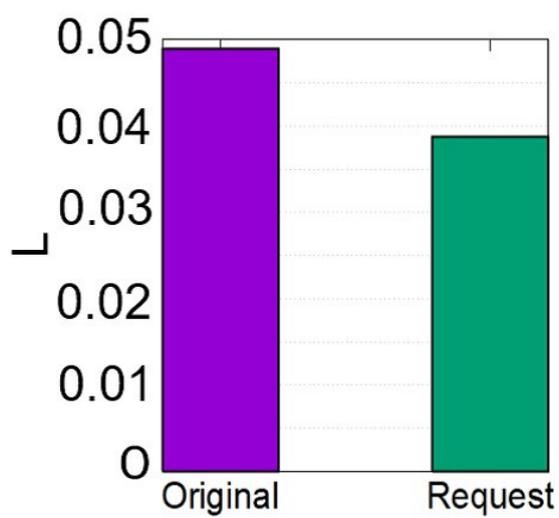


図 3.3: Average Link Load

## 第4章 コンテンツ配置ノード数設計法

本節では、本稿で提案するコンテンツ配置ノード数の設計法を述べる。

### 4.1 コンテンツ配置方式

前節ではネットワーク上のすべてのノードにコンテンツを配置することを想定しているが、配置ノード数を限定することで、さらなる FIB サイズや平均リンク負荷の低減が期待できる。そこで、コンテンツ配置ノード数  $N$  を任意に与え、前節で提案した要求比率優先配置方式を適用する。配置先ノードには CDN のキャッシュサーバが提供されている状態を想定し、1つのノードに配置可能なコンテンツの数の上限  $B$  を  $W/N * 1.01$  と設定する。ただし、 $W$  はコンテンツ数である。

### 4.2 最適配置ノード数の設計

$N$  を少数に限定して配置したとき、ネットワークの中心では負荷集中が予想される。そこで本提案方式では、リンク負荷の偏りや障害発生時のコンテンツの可用性についても考慮する。本稿では平均 FIB サイズ  $E$ 、平均リンク負荷  $L$ 、リンクの負荷の変動係数  $C$ 、コンテンツ可用性  $R$  の4つの品質尺度を考慮する。

コンテンツ要求先ノード  $s$  の要求比率を  $D(s)$ 、要求元ノード  $d$  の人口比率を  $p(d)$  としたとき、リンク  $l$  を経由するフローの集合を  $F_l$ 、ノード  $sd$  間のフローを  $f_{sd}$  とすると、 $l$  のリンク負荷は  $\sum_{f_{sd} \in F_l} D(s)p(d)$  となる。全リンクにわたるリンク負荷の平均値を  $L$ 、変動係数を  $C$  と定義する。

また、コンテンツ  $x$  の要求比率  $q_x$ 、ノード  $n$  に配置したコンテンツ集合  $O(n)$  に対し、ノード  $n$  の障害発生時、Interest パケットが転送できず、 $G_n = \sum_{x \in O(n)} q_x$  の比率の配信要求に対してオリジナルへの到達性が喪失する。本稿では単一ノード障害を想定し、障害発生時に可用性が喪失する総要求比率の最大値、すなわち  $G_n$  の全ノード中の最大値をコンテンツ可用性  $R$  と定義する。

4つの各評価尺度を、各々、最小値を引いて最大値で割ることで0~1に正規化した値を  $E'$ 、 $L'$ 、 $C'$ 、 $R'$  とする。また、0~1の値をとる設定パラメタ  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$  をこれら各尺度の重みとし、

$$D = w_1 E' + w_2 L' + w_3 C' + w_4 R' \quad (4.1)$$

で定義されるスコア  $D$  が最小となる配置ノード数を最適配置ノード数  $N^*$  として定義する。

## 第5章 性能評価

### 5.1 評価条件

表 5.1 に記す 6 つの米国のバックボーンネットワークトポロジを評価に用いる [13]. 本研究では, 平均次数 3.0 以上のネットワークトポロジを Hub&Spoke (H&S) 型, 平均次数 3.0 未満のネットワークトポロジを Ladder 型と定義する. 配置ノード数  $N$  の最大値は 30 としたが, Internet2 のみは最大値は 12 となる.

表 5.1: 本研究評価に用いた米国ネットワークトポロジ

H&S 型	ノード数	リンク数	平均次数
Allegiance Telecom	53	176	3.32
ATT	93	308	3.31
Verio	35	144	4.11
Internet2	12	42	3.50

Ladder 型	ノード数	リンク数	平均次数
At Home Network	46	110	2.39
CAIS Network	37	88	2.37

### 5.2 性能評価

表 5.2 に各トポロジ, 重み設定パターンに対する最適配置数  $N^*$  を示し, 図 5.1, 図 5.2, 図 5.3, 図 5.4, 図 5.5 に  $N$  を増加させた場合の, スコア値  $D$  の変化を示す. スコア値  $D$  の最小値を示すときが本来の最適配置数であるが, 最小値だと読み取りづらいため, 1 から差を取り,  $D$  が最大値を示すとき, 最適配置数を示す. 図 5.6, 図 5.7, 図 5.8, 図 5.9 に  $N$  を増加させた場合の, 各評価尺度の正規化値を示す.  $N$  の増加に伴い, おおよそ,  $E$  と  $L$  は増加する半面,  $C$  と  $R$  は減少する.

評価尺度の重みの設定方法として,  $E$  の重みを 0.7 とし, 他の 3 つの尺度の重みを全て 0.1 としたとき ( $W1$ ) と, 同様に,  $L$ ,  $C$ ,  $R$  の各々の重みを 0.7 とし他を 0.1 とした場合 ( $W2$ ,  $W3$ ,  $W4$ ) と, さらに 4 つの全尺度の重みを均等に 0.25 とした場合 ( $EQ$ ) の 5 つで評価する.

$W1$  は平均 FIB サイズに重み 0.7 を置いたときであり, 全コンテンツを 1 カ所にまとめて配置すると, 他ノードから本ノードに至る経路は, 同じ TLD をもつオブジェクトであれば 1 つに集約される. しかし  $N$  の増加に伴い, 出力ポートが多数のポートに分散する

表 5.2: コンテンツの配置ノード数の最適値  $N^*$ 

H&S 型	W1	W2	W3	W4	EQ
Allegiance Telecom	1	2	28	21	2
ATT	1	2	28	21	3
Verio	1	1	21	21	9
Internet2	1	2	12	12	3
Ladder 型	W1	W2	W3	W4	EQ
At Home Network	1	2	27	21	5
CAIS Network	2	1	21	21	6

ため、FIB のエントリ集約が難しくなり、平均 FIB サイズは増加する。各トポロジで  $D$  の増加量は異なるが、ノード数が少ない時ほど FIB 集約効果は向上するため多くのトポロジにおいて  $N^*=1$  が最適となる。

W2 は平均リンク負荷に重み 0.7 を置いたときである。このとき、中心ノード近くに要求比率の高いノードを配置することで、ネットワーク全体からコンテンツを取得しやすくなり、平均リンク負荷は低下する。そのため、 $N$  の増加に伴いコンテンツがネットワーク上に分散して配置され平均リンク負荷が増加するため、やはり  $N$  が小さい場合が最適となる。

W3 はリンク負荷の変動係数に重み 0.7 を置いたときである。ネットワークの中心から順に URL を配置していくため、配置ノード数が少ないときは中心近くのリンク負荷が大きく、中心から離れたノードのリンク負荷は小さくなるため、変動係数は大きい。 $N$  の増加に伴い、コンテンツがネットワーク全体に配置されるため、ネットワークの中心だけでなく全体にリンク負荷が分散され変動係数は減少する。そのため  $N$  は大きな値が最適となる。

W4 はコンテンツ可用性に重み 0.7 を置いたときである。 $N$  の増加に伴い、各コンテンツ配置ノードの配置コンテンツ数は減少するため、 $R$  は減少する。そのため  $N$  は大きな値が最適となる。

このように 1 つの指標に重点的な重みをつけた場合はトポロジのタイプによらず類似した結果が得られたが、一方で全ての指標に同じ重みをつけた場合、トポロジのタイプごとに異なる傾向を示した。図 5.10 に  $N$  を増加させた場合のコンテンツ配置ノードの平均次数、図 5.11 にあるノード  $x$  からコンテンツ配置ノード  $d$  への最短経路上に存在する  $d$  以外のコンテンツ配置ノード  $c$  の数の平均  $H$  を示す。

H&S 型のトポロジではノードの平均次数が Ladder 型と比べて大きく、ネットワークの中心ノードは特に次数が高い傾向がある。また、コンテンツ取得経路上にコンテンツ配置ノードがある割合が低い。そのため、経路上に同一 TLD をもつ Web オブジェクトが配置されにくく、平均 FIB サイズの増加度が大きい。逆に、多くのリンクと繋がるノードにコンテンツが配置され、経路も分散されるため、リンク負荷の変動係数については減少度が大きい。このような理由から、H&S 型の  $N^*$  は小さな値となる。Verio は H&S 型のトポロジであるが、ノード数に対するリンク数が多く、平均次数が他の H&S 型トポロジよりも大きい。そのため、出力ポートが多数のポートに分散されやすく、FIB エントリサイズの集約度が特に低い。そのため、平均 FIB サイズが他の H&S 型よりも急激に大きくなる

ため、H&S 型と比べて最適配置数が大きくなる。

一方で、Ladder 型のトポロジではノードの平均次数が小さく、ネットワークの中心ノードでの次数の大きさは周辺ノードと比べて H&S 型ほど大きくない。そのため、コンテンツ取得経路上にコンテンツ配置ノードがある割合が高く、コンテンツ取得経路が重複しやすい。同一経路上の FIB の出力ポートは、同一ポート番号に限られるため、 $N$  の増加に伴って、平均 FIB サイズは緩やかに増加する。しかし、コンテンツ取得経路が多数に分岐しにくいことで、負荷が同一リンクに集中し、リンク負荷の変動係数は緩やかに減少する。このような理由から Ladder 型の  $N^*$  は H&S 型より少し大きい値となる。

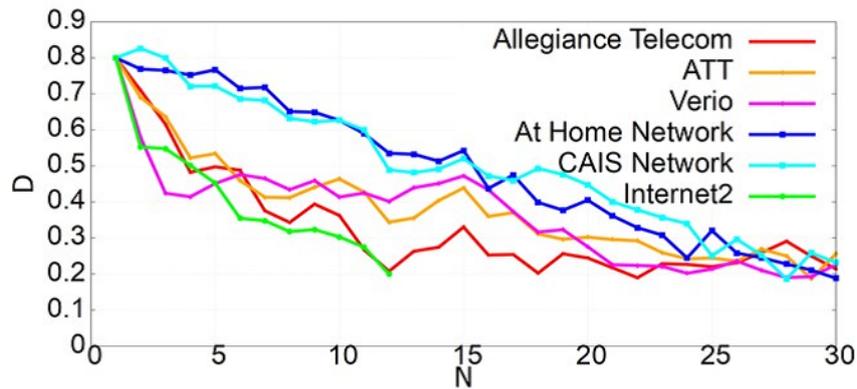


図 5.1:  $N$  に対する  $W1$  のスコア値  $D$

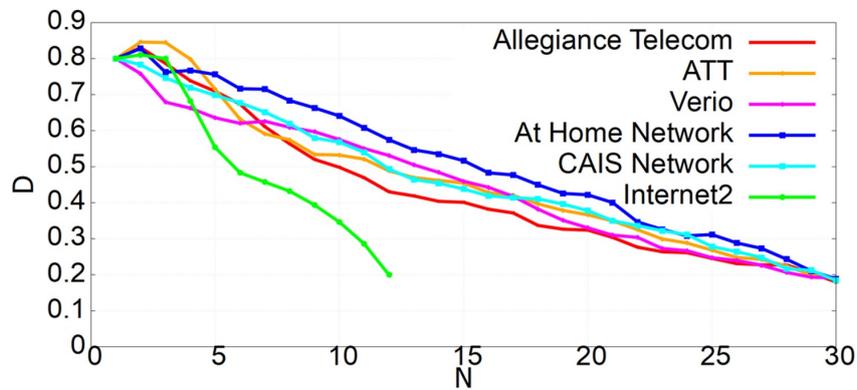


図 5.2:  $N$  に対する  $W2$  のスコア値  $D$

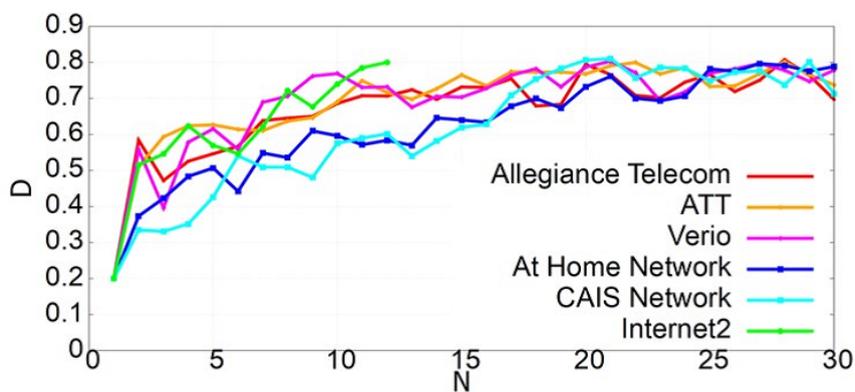


図 5.3:  $N$  に対する  $W3$  のスコア値  $D$

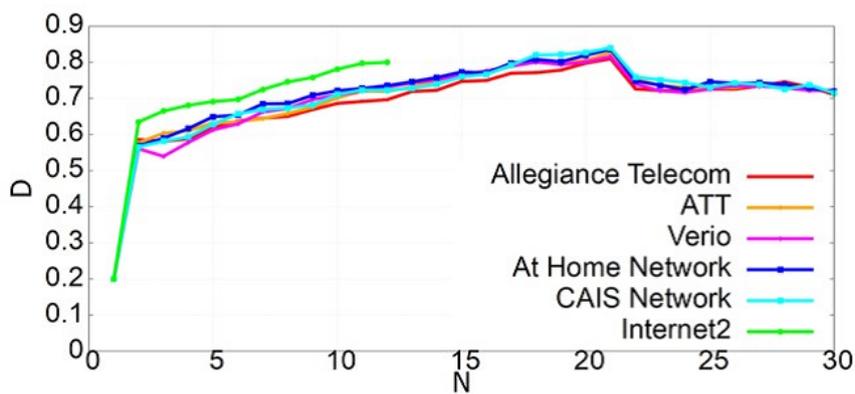


図 5.4:  $N$  に対する  $W4$  のスコア値  $D$

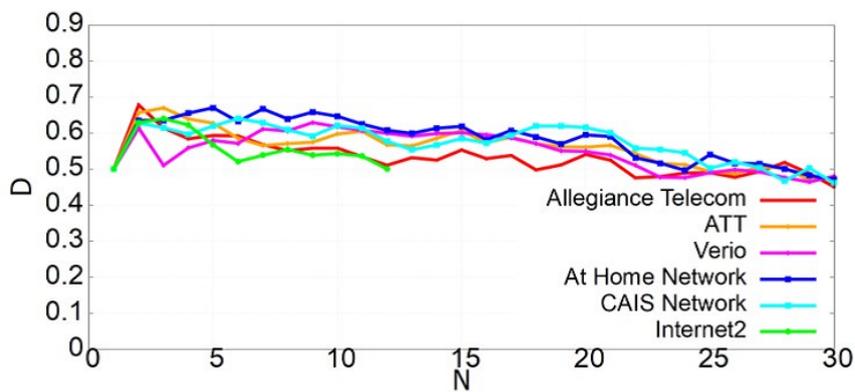


図 5.5:  $N$  に対する  $EQ$  のスコア値  $D$

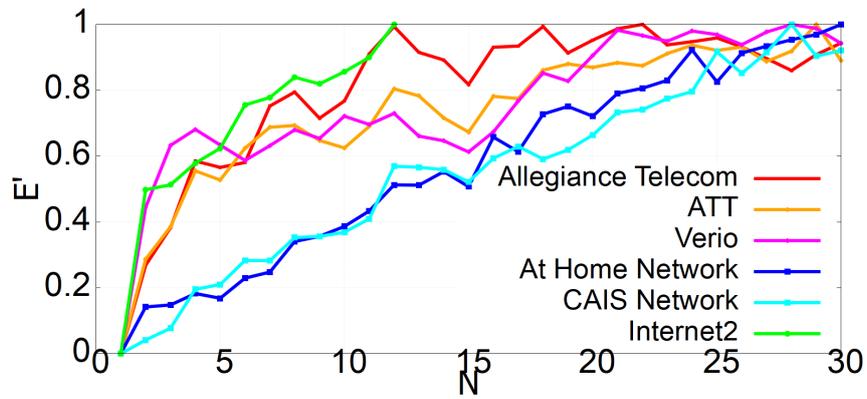


図 5.6:  $N$  に対する正規化平均 FIB サイズ  $E'$

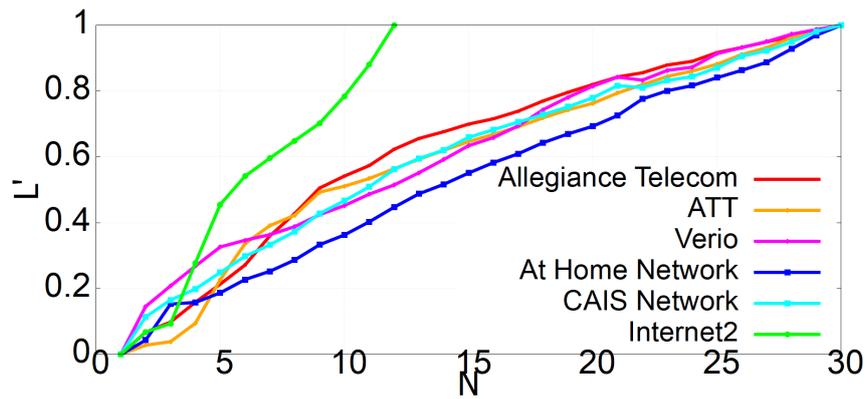


図 5.7:  $N$  に対する正規化平均リンク負荷  $L'$

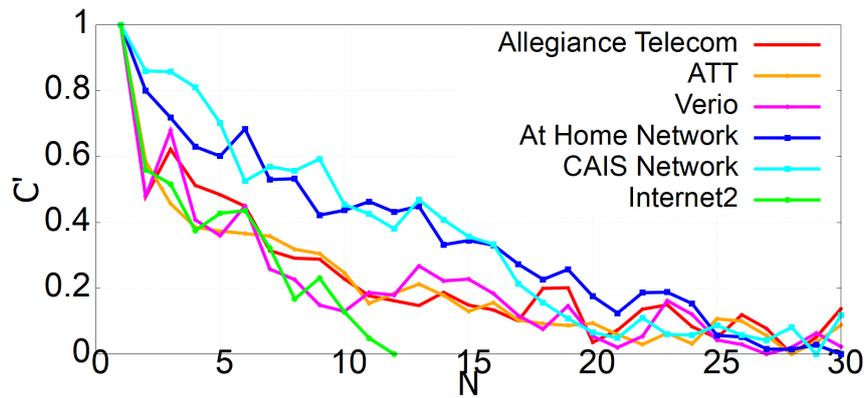


図 5.8:  $N$  に対する正規化リンク負荷の変動係数  $C'$

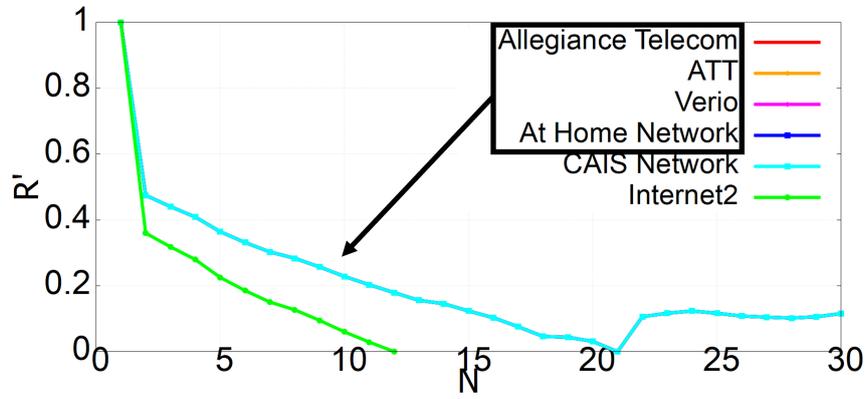


図 5.9:  $N$  に対する正規化コンテンツ可用性  $R'$

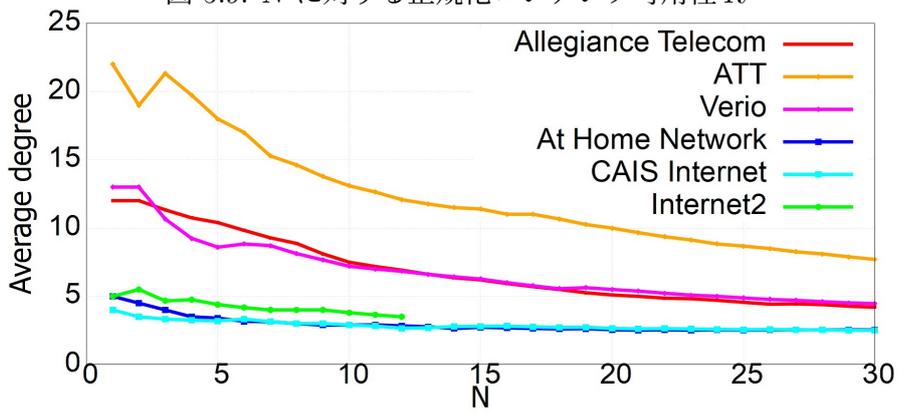


図 5.10:  $N$  に対するコンテンツ配置済みノードの平均次数

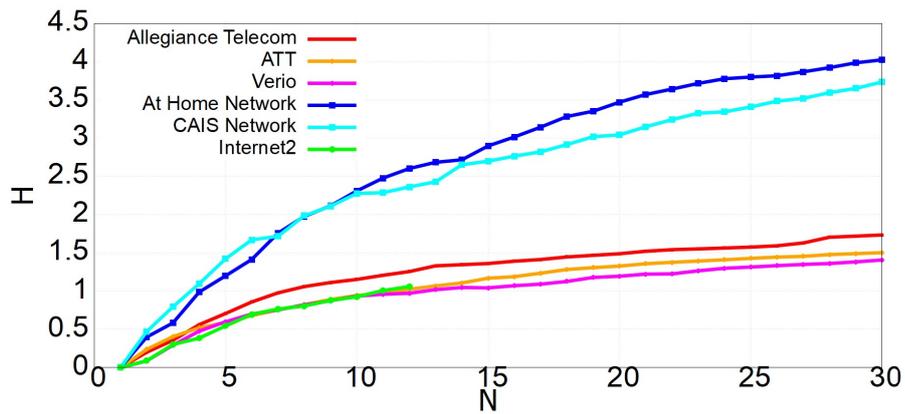


図 5.11:  $N$  に対する最短経路上のコンテンツ配置済みノード数の平均  $H$

## 第6章 まとめ

この論文では、まずネットワークの中心から高人気コンテンツを配置することで平均 FIB サイズと平均リンク負荷を同時に低減可能であることを示した。そして、同様のコンテンツ配置方法でノード数を限定し、4つの尺度の評価重みやトポロジタイプを考慮した際の、最適な配置ノード数に与える影響について考察した。そして、評価重みが一定であるとき、ネットワークの中心から配置すると、H&S 型と Ladder 型では最適な配置ノード数が異なる傾向があることを確認した。今後は、配置するノード順を変えた場合の比較や考察を行い、FIB サイズ集約とネットワーク負荷を更に低減するためのコンテンツ配置方式を検討する。また、本稿ではコンテンツが静的で変化しない条件を想定したが、コンテンツが動的に生成・消滅する場合の動的なコンテンツ配置方法についても研究を行う予定である。

## 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] A. Afanasyev, et al., SNAMP: Secure Namespace Mapping to Scale ICN Forwarding, GIS 2015.
- [2] O. Ascigil, S. Rene, I. Psaras, and G. Pavlou, On-Demand Routing for Scalable Name-Based Forwarding, ACM ICN 2018.
- [3] R. Chiocchetti, D. Rossi, and G. Caroglio, Exploit the Known or Explore the Unknown? Hamlet-Like Doubts in ICN, ACM ICN 2012.
- [4] J. Choi, J. Han, E. Cho, T. Kwon, and Y. Choi, A Survey on Content-Oriented Networking for Efficient Content Delivery, IEEE Commun. Mag., vol.49, no.3, pp.121-127, Mar. 2011.
- [5] \*A. Detti, M. Pomposini, N. Blefari-Melazzi, and S. Salsano, Supporting the Web with an information centric network that routes by name, Elsevier Computer Networks, Vol. 56, No. 17, pp. 3705-3722, Nov. 2012
- [6] K. Katsaros, et al., On the Inter-domain Scalability of Route-by-Name Information-Centric Network Architectures, IFIP Networking 2015
- [7] • A. Rodrigues, P. Steenkiste, A. Aguiar, Analysis and Improvement of Name-based Packet Forwarding over Flat ID Network Architectures, ACM ICN 2018.
- [8] • T. Schmidt, S. Wolke, N. Berg, and M. Wahlsch, Let's Collect Names: How PANINI Limits FIB Tables in Name Based Routing, IFIP Networking 2016.
- [9] G. Xylomenos, et al., A Survey of Information-Centric Networking Research, IEEE Communications Survey and Tutorials, Vol. 16, No. 2, pp.1024-1049, 2014.
- [10] W. So, A. Narayana, and D. Oran, Named data networking on a router: Fast and DoS-resistant forwarding with hash tables, ACM/IEEE ANCS 2013.
- [11] L. Zhang, et al., Named Data Networking (NDN) Project, Technical Report NDN- 0001, Oct. 2010.
- [12] Y. Sasaki, et al., Designing Content Placement of CDN for Improving Aggregation Effect of ICN FIBs, ICOIN 2020
- [13] CAIDA webpage, <http://www.caida.org/data>