

令和4年度 春学期 卒業研究3 (BI)
学士論文

題目 ICN 導入が他ISP の利益に与え
る影響の分析

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 2600190037-3

伊藤 榎基

令和5年1月31日

概要

インターネットでは、今日、トラフィック量の急速な増加が予想されるため、効率的なコンテンツ配信として、各ルータにおいてコンテンツをキャッシュし、コンテンツ名を主体とした通信である、情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) の導入が広く検討されている。ISP はインターネット全体への接続性を確保するため、トランジット ISP と接続を行ない、トランジット ISP はトラフィック量に応じたトランジット費を得ているが、ICN の導入にあたり、ISP 間の交流トラフィックパターンが変化するため、ICN 導入が各 ISP の利益に影響を与える。また、ICN の導入は各 ISP の判断に基づくため、ICN の普及可能性を明らかにするためには、ICN 導入による各 ISP の利益への影響を分析する必要がある。これまでの研究では、階層的な ISP 間のトポロジ構造を対象に、ICN を徐々に導入していった場合の各 ISP の利益に与える影響が分析されており、ICN 導入を促進するためには、インセンティブが必要であることが予想できる [13][14]。ICN 普及のためのインセンティブ付与を実現するシステムとして、収益が増加する ISP から増加収益の一部を徴収して基金を作り、収益が減少する ISP に基金から補助金を付与することが有効である。そこで本研究では、階層型 AS トポロジを想定したときの、各 AS の ICN 導入が他 AS の利益に与える影響を解析的に導出する。

目次

概要	1
第 1 章 序論	3
1.1 研究の背景	3
1.2 研究の目的	3
第 2 章 想定条件	5
2.1 モデル化	5
2.1.1 コンテンツ	5
2.1.2 トランジット費	5
2.1.3 ネットワークコスト	6
2.1.4 キャッシュコスト	6
2.1.5 AS 間トポロジ	6
2.1.6 CP, ユーザの収容パタン	8
2.1.7 キャッシュ設計	8
2.1.8 AS ポリシーの仮定	8
2.2 各 AS 間の利益の導出	9
第 3 章 ICN 導入で他の AS に与える影響の導出	11
3.1 トランジット費の収益の変化の導出	11
3.1.1 downhill 方向フロー流入確率の減少割合の導出	11
3.1.2 uphill 方向フロー流入確率の減少割合の導出	12
3.1.3 トラフィック量の変化からトランジット費の収益への変換	13
3.2 配信遅延時間低減によるユーザからの収益の変化の導出	13
3.2.1 hop 数の平均減少量の導出	13
3.2.2 hop 数の変化から収容ユーザによる収益への変換	13
第 4 章 数値評価	14
4.1 トランジット費	14
4.2 収容ユーザからの収益	14
第 5 章 まとめ	16
謝辞	17

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在のネットワークの環境では、IP アドレスを用いて、サーバがクライアントへ、ルータといったネットワーク機器を用いてパケットを転送することが一般的である。これは、通信に際して、コンテンツ名と IP アドレスを変換する名前解決のためのオーバーヘッドが発生する。また、昨今、インターネットではテキストや画像のやりとりだけでなく、動画や音声のような大容量のリッチコンテンツとよばれるものが主流になっており、YouTube や Netflix などに代表される動画事業者からの配信といったように、大容量、低遅延のコンテンツ配信の需要が大きく増加している。以上からトラフィックの急激な増加が予想されるため、効率的なコンテンツ配信として、各ルータにおいてコンテンツをキャッシュし、コンテンツ名を主体とした通信である、情報指向ネットワーク (ICN: information-centric networking) の導入が広く検討されている。ICN では、コンテンツ要求元が interest を送出したとき、各経路上ルータはコンテンツ名で転送する。この時、要求コンテンツがルータ内でキャッシュされている場合には interest を転送せずに、コンテンツを直接配信する。これにより、名前解決のためのオーバーヘッドを回避し、また、よりユーザに近い位置からの効率的なコンテンツ配信が可能となることで、遅延時間や NW 負荷の軽減が期待できる。インターネットは異なる組織によって運用される多数の NW (AS: Autonomous System) を相互に接続し構成されているが、各 AS はインターネット全体への接続性を確保するため、トランジット ISP と接続を行なう。トランジット ISP はトラフィック量に応じたトランジット費を得ているが、ICN の導入にあたり、ISP 間の交流トラフィックパターンが変化するため、ICN 導入が各 ISP の利益に影響を与える。また、ICN の導入は各 ISP の判断に基づく。そのため、ICN の普及可能性を明らかにするには、ICN 導入による各 ISP の利益への影響を分析し、普及促進の方法を検討する必要がある。

1.2 研究の目的

ICN の導入は、各 ISP によって独立して判断され、利益が見込まれない場合、ISP は、ICN を導入しないといえる。これまでの研究では、階層的な ISP 間のトポロジ構造を対象に、すべての ISP、または、一部の ISP のみが ICN を導入した状態での ICN 導入が、各 ISP の利益に与える影響を分析した。その結果、利益の減少する ISP と増加する ISP があり、ICN 導入を促進するために収益が増加する ISP から、収益が減少する ISP へのインセンティブが必要であることが分かった。しかし、インセンティブを支給する仕組みについては未検討である。ICN 普及のためのインセンティブ付与を実現するシステムとして、収益が増加する ISP から増加収益の一部を徴収して基金を作り、収益が減少する ISP に基金から補助金

を付与することが有効である．そこで本研究では，普及促進の方法を検討するために，階層型 AS トポロジを想定したときの，各 AS の ICN 導入が他 AS の利益に与える影響を解析的に導出する

第2章 想定条件

2.1 モデル化

各 ISP の利益に与える影響を分析するための、本稿で想定する AS 間の階層的な ISP 間のトポロジ構造や、各種条件、設計のモデル化について説明する。

2.1.1 コンテンツ

大容量の M 個のリッチコンテンツが全 AS の NW 上で提供されている環境を想定する。各コンテンツのサイズは L (Mbytes) で均一とし、各ユーザの月間平均視聴回数を d 、各コンテンツ m が一定の確率 q_m で選択されるとする。各コンテンツは q_m の降順で割り当て、 q_1 が最も人気度の高いコンテンツ、 q_M が最も人気度の低いコンテンツの要求比率となるものとする。ならびに、 Q_m を q_m の累積分布とする ($Q_m = \sum_{i=1}^m q_i$)。またユーザの総数を U_1 、CP (contents provider) の総数を U_2 とする。

2.1.2 トランジット費

多くの ISP はトランジット契約をした ISP に対して、月間にトランジットリンク上に流れたデータ転送レートに応じた料金を課金する。月間のトランジット費 T はデータ転送レート V (Mbps) の 0.75 乗に比例し $T = 100V^{0.75}$ で近似できる [2]。また、 V は平均転送レートの 3 倍と仮定する [3]。また、リンク上には provider から customer に向かう downhill 方向と、customer から provider に向かう uphill 方向の各々にトラフィックが流れるが、 V の大きな方向の値に基づく場合 (max model) と、両方向の合計値に基づきトランジット費を算出する場合 (sum model) がある [11]。リンクを downhill と uphill の各々の方向に月間に流れるコンテンツの配信回数を、それぞれ、 D_d 、 D_u とするとトランジット費算出に用いられる V の値は、 $V = (3 \times 8LD)/(30 \times 24 \times 3600) = 1.08 \times 10^{-5}LD$ となる。ただし D は、

$$D = \begin{cases} \max(D_d, D_u), & \text{max model} \\ D_d + D_u, & \text{sum model} \end{cases} \quad (2.1)$$

で与えられ、月間のトランジット費 T は次式で得られる。

$$T = 100 \{1.08 \times 10^{-5}LD\}^{0.75} \quad (2.2)$$

2.1.3 ネットワークコスト

各ISPはNWの構築・運用コストを負担する必要がある、自NW上でコンテンツを1回配信するごとに κ の配信コストが発生すると仮定し、月間のISP間のトランジット費を配信コストに適用する。2013年の米国における1Mbpsあたりの平均トランジット価格は1.57 USDであり[7]、商用VoDサービスにおけるピーク時の需要量は平均量に対して約1.8倍である例が報告されていることから[12]、 $\kappa = (1.57 \times 1.8 \times 8L) / (30 \times 24 \times 3600) = 8.72 \times 10^{-6}L$ で与える。

2.1.4 キャッシュコスト

ICNを用いる場合には、各ルータにおいてキャッシュメモリを導入し、そのコストを負担する必要がある。DRAMを用いること、キャッシュメモリを3年で置き換えることを想定し、1Mbytesあたりのメモリコストを0.016 USDとすると[9]、容量が B (単位はコンテンツ数)のキャッシュメモリのコストは $0.016LB/36 = 4.44 \times 10^{-4}LB(\text{USD})$ となる。

2.1.5 AS間トポロジ

二つのASが接続するときの形態は、転送データ量に応じたトランジット費を徴収するトランジット接続と、両者料金支払いのないピアリング接続とに分類できる。二つのASの規模が大きく異なるような場合、大きな方がproviderとなり相手ASにトランジットサービスを提供する。もう一方のASはcustomerとなり、providerに対してトランジット費を支払う。一方、トランジット費の受け渡しが発生しないピアリング接続は、同程度の規模のASが接続する際に用いられることが多い。

二つのAS、 x と y が、 x がproviderとして、 y がcustomerとしてトランジット接続をする場合、 x から見たときの両者を接続するリンクをprovider-to-customer (p2c) リンクと、 y から見たときにはcustomer-to-provider (c2p) リンクと呼ぶものとする。このため同一のトランジット接続リンクが、一方にとってはp2cリンクに、他方にとってはc2pリンクとなる。一方、ピアリング接続で二つのASを繋ぐリンクをpeer-to-peer (p2p) リンクと呼ぶことにする。レイヤ k のAS(以後、 L_k ASと表記) x が L_{k+1} AS y に対してp2cリンクを有する場合、 y は x に対してc2pリンクを有することになり、両端のASの一方にとってはp2cリンクであり、他方のASにとっては同一のリンクがc2pリンクとなる。

CAIDAのWebサイトで公開されているAS間のトポロジに関する以下の二つのデータを用いてASトポロジをモデル化している[1]。

as_rel file BGP テーブル情報(RouteView)と、AS間のルーティングポリシー情報(IRR: Internet Routing Registries)から2005年に推定したAS間トポロジデータを用いて、文献[5]の方法で18,967個のAS間に存在する85,136のリンクをp2p, p2c, c2pの三つに分類したデータ

as2attr file 上記AS間トポロジデータを用いて、文献[6]の方法で19,537個の各ASの属性を、Large ISPs, Small ISPs, Universities, IXPs, NICs, Customersに分類したデータ

上記二つのデータを用いて, AS 間のトポロジをツリー型の階層トポロジでモデル化する [13]. 結果, 17,143 の AS は 7 つのレイヤに分類されている. 各レイヤに分類された AS の数を as2attr の各 AS 属性に対してまとめたものが, 表 2.1 になる.

表 2.1: Number of ASes classified into each layer in each AS type

Layer	Large ISPs	Small ISPs	Universities	Customers
1	10	39	0	0
2	33	2,090	189	5,123
3	1	2,574	390	4,529
4	0	668	110	1,202
5	0	60	4	106
6	0	3	0	9
7	0	2	0	1

Universities AS と Customers AS はユーザや CP を収容する NW とみなせる. また, 目的はトランジット費の分析であるため, AS トポロジの構成 AS として Large ISPs と Small ISPs のみを考える. そのため AS と ISP を同じ意味で用いる. 17,143 の AS のうち Large ISPs もしくは Small ISPs に分類された 5,473 の AS に対して, 各々にレイヤを割り当てたときの分類 AS 数は以下ようになる.(表 2.2)

表 2.2: Number of ASes classified into each layer when considering only large ISPs and small ISPs

Layer	Large ISPs	Small ISPs	Total
1	10	39	49
2	33	2,090	2,123
3	1	2,564	2,565
4	0	669	669
5	0	64	64
6	0	2	2
7	0	1	1

大部分の Large ISPs と Small ISPs は, レイヤ 1~3 のいずれかに割り当てられることから, これら 3 つのレイヤに分類された 4,737 の AS を用いて AS 間トポロジをモデル化する. すなわちレイヤ数は $K = 3$ で, 各レイヤ k の AS 数は $N_1 = 49$, $N_2 = 2,123$, $N_3 = 2,565$ となる. そして g_k^{pc} , g_k^{cp} , g_k^{pp} を各々, 各 L_k AS の, L_{k+1} AS に対する平均 p2c リンク数, L_{k-1} AS に対する平均 c2p リンク数, L_k AS に対する平均 p2p リンク数と定義する. 4,737 の AS の接続構造から算出した g_k^{pc} , g_k^{cp} , g_k^{pp} の値をまとめたものは, 表 2.3 になる.

各 L_k AS ($1 \leq k \leq K-1$) は各 L_{k+1} AS と各々, 均一な確率 g_k^{pc}/N_{k+1} で p2c リンクを有すること, 同様に各 L_k AS ($2 \leq k \leq K$) は各 L_{k-1} AS と各々, 均一な確率 g_k^{cp}/N_{k-1} で c2p リンクを有する. また, 各 k ($1 \leq k \leq K$) の各 L_k AS は, 同一のレイヤ k に属する他の各 AS と, 均一な確率 $g_k^{pp}/(N_k - 1)$ で p2p リンクを有することを想定している.

表 2.3: Average number of links of each type from each AS

Layer	g_k^{pc}	g_k^{cp}	g_k^{pp}
1	440.41	0.00	3.27
2	10.14	10.16	5.72
3	0.00	8.40	0.46

2.1.6 CP, ユーザの収容パタン

コンテンツを提供する CP とコンテンツを要求するユーザについて, Universities もしくは Customers に分類された AS に対して均一に, CP とユーザは収容されていると仮定する. 表 2.1 において, レイヤ k に割当られた Universities もしくは Customers AS は L_{k-1} AS に対して c2p リンクを有することから, L_k AS に収容された CP とユーザの比率 W_k は, $W_1 = 0.460$, $W_2 = 0.426$, $W_3 = 0.114$ となる. また各レイヤ k において, N_k の各 AS は均一に CP・ユーザを収容しているものとし, 各 CP の提供コンテンツに対する要求比率と, 各ユーザの配信要求発生レート, 各コンテンツの選択確率はそれぞれ均一であると想定する. このとき, コンテンツの配信要求が発生したときに, その要求元ユーザと, 要求コンテンツのオリジナルを保有する CP が各 L_k AS に収容されている確率 ω_k は $\omega_k = W_k/N_k$ となる.

2.1.7 キャッシュ設計

各ルータにキャッシュが設置されるため, AS 間の交流トラヒックは, AS 内のトポロジ・各ルータのキャッシュ容量・キャッシュ運用ポリシー等の影響を受ける. ICN を導入している各 AS は自 NW 内の全てのルータ間でキャッシュ情報を交換することで, 各ルータでのキャッシュコンテンツの重複を回避しつつ, 到着した Interest に対するコンテンツを任意のルータが保有する場合には, そのルータに Interest が転送され, 要求元にコンテンツが送信されるものとする. そのため, 各ルータのキャッシュ容量や AS 内のトポロジについては考慮せず, 各 AS の全ルータのキャッシュ総容量 B のみを考える (単位はコンテンツ数). 同一のレイヤに割当られた AS は全て同一の B を有するものとし, 各 L_k AS のキャッシュ容量を B_k とする. 上位のレイヤに属する AS ほど規模が大きくなことが予想されるため, $B_k > B_{k+1} (1 \leq k \leq K-1)$ を想定する.

2.1.8 AS ポリシーの仮定

provider AS は customer AS に対してインターネット全体に対する到達性 (トランジット) を提供する義務があることから, 受信した全ての経路を広告する [10]. またピアリング接続をしている二つの AS 間には, 通常, 互いのトラヒックを自由に無償で送受信できるため, 各 AS は p2p 接続先の AS に対しても受信した全ての経路を広告する. 一方で customer AS は provider AS に対して経路を広告すると, c2p リンク上の downhill 方向のトラヒック量が増加することから, 経路を広告しない. しかし, 自身から p2c リンクのみ

を経由して到達できる全ての AS(CC:customer cone と定義 [5]) が収容するユーザや CP のオリジナルサーバのインターネットへの到達性を保障する義務があることから、これらのアドレスに対しては provider AS に広告する。最上位の L_1 AS は自身の customer に対してインターネットへの到達性を保障する必要があることから、全 L_1 AS 間で完全に経路情報が交換される。

各 AS は、p2p 接続先の peer AS、p2c 接続先の customer AS、そして c2p 接続先の provider AS の複数から経路広告を受けているアドレスに対する Interest を受信した場合には、p2c 接続先 (トランジット費が得られる)、p2p 接続先 (トランジット費の受払が生じない)、c2p 接続先 (トランジット費を支払う) の優先順位で Interest を転送する。本ポリシーの結果、AS 間経路は経由最上位レイヤが k であるとき、配信サーバから L_k AS に到達するまでは c2p リンクのみを経由し、レイヤ k では単一の AS か、もしくは p2p リンクを用いて複数の AS を経由した後、p2c リンクのみを経由して要求元のユーザにコンテンツが配信される。このような AS 間経路の特徴は Valley-free ルーティングとして知られている [8]。ICN を用いている AS は、自 NW 内を流れたコンテンツをルータにおいてキャッシュするか否かを自由に判断することができる。provider AS から c2p リンクを downhill 方向に転送されてきたコンテンツをキャッシュすることで、次回以降、自身の CC から同一のコンテンツに対する Interest を受信した場合には、provider AS に Interest を転送することなく、自身のキャッシュから該当コンテンツを配信することができ、その結果、c2p リンクを downhill 方向に流れるトラヒック量を削減することが可能となる。そのため provider AS から受信したコンテンツは自 NW 内でキャッシュする [4][10]。一方、customer AS から p2c リンクを uphill 方向に転送されてきたコンテンツをキャッシュすると、同一コンテンツに対する Interest が provider や peer AS から到達した場合に、自身の p2c リンクを uphill 方向にコンテンツが流れず、customer AS からのトランジット収入が減少するためキャッシュしない [4][10]。また peer AS から受信したコンテンツについても、p2p リンク上を流れるトラヒックについてはトランジット費が発生しないことから、キャッシュ資源を節約するためにキャッシュしない [4]

2.2 各 AS 間の利益の導出

まず、2.1 節で述べた想定条件に基づき、部分的に ICN を導入した場合の、AS 間のリンク上に発生するトラヒック量を導出する。 L_k AS が ICN を導入している確率を P_k とすると、各 L_k AS の各 c2p リンクを配信フローが uphill 方向に通る確率 $F_{u,k}$ 、c2p リンクを配信フローが downhill 方向に通る確率 $F_{d,k}$ 、peer AS もしくは、自身の収容 CP から配信フローが通る確率 $F_{p,k}$ はそれぞれ以下のようなになる [13][14]。

$$F_{u,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=k}^K \sum_{t=1}^{k-1} G_{r,s,t} \frac{W_r W_s}{N_k g_k^{cp}} \left[\prod_{n=t}^r (1 - P_n) + \sum_{m=t}^r \prod_{n=t}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (2.3)$$

$$F_{d,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=1}^K \phi_{r,s,k} W_r W_s \left[\prod_{n=k}^r (1 - P_n) + \sum_{m=k}^r \prod_{n=k}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (2.4)$$

$$F_{p,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=1}^K \mu_{r,s,k} W_r W_s \left[\prod_{n=k+1}^r (1 - P_n) + \sum_{m=k+1}^r \prod_{n=k+1}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (2.5)$$

ただし, $G_{r,s,t}$ は, ユーザがレイヤ r , CP がレイヤ s のときに, 配信フローの経由最上位レイヤが t となる確率である. $\phi_{r,s,k}$ と, $\mu_{r,s,k}$ は, それぞれ, ユーザがレイヤ r , CP がレイヤ s のときの, 各 L_k AS の c2p リンクを配信フローが通る確率と, 各 p2p リンクや自身の収容 CP から配信フローが流入する確率である. また, L_k AS のキャッシュの上限は σ_k で, オリジナルサーバから配信される確率は, $1 - Q_{(\sigma_k)}$ で表せられる.

第3章 ICN 導入で他の AS に与える影響の導出

3.1 トランジット費の収益の変化の導出

ある AS_y が新たに ICN を導入するとき、いくつかのコンテンツは y から直接配信されるようになり、ある AS_x のトラフィック量の減少が予想される。まずはこの減少する割合を求めることで、トラフィック量削減による各 AS のトランジット費の収益への影響を定量化する。

3.1.1 downhill 方向フロー流入確率の減少割合の導出

L_j AS y が ICN を導入したとき、一部の配信フローが、 L_i AS x の downhill 方向に流れなくなる（ICN が機能し x が影響を受ける）条件を考える。

まず、配信フローが downhill 方向に流れるのは、AS_x の CC 収容ユーザから、非 CC 収容 CP への要求発生時で、y が x の CC である場合において、x の downhill 方向の配信フローが削減される。 $(i < j)$ CC である AS は重複する（ある AS は複数の AS の CC になりえる）ことを考慮しなければならないため、c2p リンク数に着目して、再帰的に求める。 L_j AS y が L_i AS x の CC である確率を $R_{i,j}^{cc}$ とすると、次のように表せられる。

$$P_{i,j}^{cc} = \frac{\sum_{n=0}^a (N_i - g_{i+1}^{cp} - n)}{\sum_{n=0}^a (N_i - n)} \quad (3.1)$$

ただし、 $a = P_{i,j-1}^{cc} \cdot N_{j-1}$, で $i = j - 1$ のとき $a = 1$ とする。

次に、interest が x の CC 収容ユーザから送出される場合であるが、y を経由せずに x に到達するコンテンツ配信の場合、y の ICN 導入は x に影響を与えないことを考慮する必要がある。そのため、求めるべき確率は、x の CC であるユーザが y の CC である条件付き確率である。ここで、ユーザもしくは、CP を収容する L_k AS の CC である確率は各々 $1/N_k$ で、また、AS y が AS x の CC であるとき、y の CC であるユーザは、x の CC かつ y の CC であるといえることから、

$$P(y \text{ の CC} | x \text{ の CC}) = \frac{P(x \text{ の CC} \wedge y \text{ の CC})}{P(x \text{ の CC})} = \frac{P(y \text{ の CC})}{P(y \text{ の CC})} = \frac{N_i}{N_j} \quad (3.2)$$

となる。

さらには、配信経路上で、すでに ICN を導入している AS があり、そこでキャッシュされる

場合も同様に, y の ICN 導入は, x に新たに影響を与えない. ここで, 上位のレイヤに属する AS ほど規模が大きくなることが予想されることから, $B_k > B_{k+1} (1 \leq k \leq K-1)$ と想定されるため, ユーザから y までの経路上と, y から x までの経路上とで分けて考える. downhill 方向の配信経路上の ICN 普及によって影響が出ない確率を $P_{d,i,j}^{path}$ とすると, 以下のように得られる.

$$P_{d,i,j}^{path} = \sum_{r=j}^K \frac{W_r}{\sum_{n=j}^K W_n} \left[\prod_{n=j+1}^r (1-P_n) + \sum_{m=j+1}^r \prod_{n=j+1}^{m-1} (1-P_n) P_m \{1-Q_{(\sigma_m)}\} \right] \sum_{n=i+1}^{j-1} (1-P_n) \quad (3.3)$$

ただし, ユーザのレイヤによる重み付けをし, 前半部分は, ユーザから y までの経路上において, すべての AS で ICN が導入されていない場合, 後半部分は, y から x までの経路上において, 一部の AS で ICN が導入されており, ICN 導入 AS の最上位レイヤが m であるが, キャッシュされていない場合にそれぞれ対応している.

最後に y でコンテンツがキャッシュされている確率は, 先述の通りで, $Q_{(\sigma_j)}$ である. 以上の条件をすべて満たすとき, y の ICN 導入は, 新たに x に影響を与える. よって, L_j AS y が ICN を導入したときの, L_j AS x の downhill 方向のフロー流入確率の減少割合を $F_{d,i,j}^{dec}$ とすると

$$F_{d,i,j}^{dec} = P_{i,j}^{cc} * P(y \text{ の } CC | x \text{ の } CC) * P_{d,i,j}^{path} * Q_{(\sigma_j)} \quad (3.4)$$

で表せられる.

3.1.2 uphill 方向フロー流入確率の減少割合の導出

同様にして, L_j AS y が ICN を導入したとき, 一部の配信フローが, L_i AS x の uphill 方向に流れなくなる (ICN が機能し影響を受ける) 条件を考える. 配信フローが uphill 方向に流れるのは, AS x の非 CC 収容ユーザから, CC 収容 CP への要求発生時である. そのため, 求める確率は, y が x の非 CC である確率, x の非 CC であるユーザが y の CC である確率, uphill 方向の配信経路上の ICN 普及によって影響が出ない確率で, それぞれ

$$\begin{aligned} \neg P_{i,j}^{cc} &= 1 - P_{i,j}^{cc} \\ P(y \text{ の } CC | x \text{ の非 } CC) &= \frac{N_i}{N_j(N_i - 1)} \\ P_{u,i,j}^{path} &= \sum_{r=j}^K \frac{W_r}{\sum_{n=j}^K W_n} \left[\prod_{n=j+1}^r (1-P_n) + \sum_{m=j+1}^r \prod_{n=j+1}^{m-1} (1-P_n) P_m \{1-Q_{(\sigma_m)}\} \right] * \\ &\quad \sum_{r=j}^K \sum_{s=i}^K \sum_{t=1}^{\min(r,s)} G_{r,s,t} \frac{W_r}{\sum_{n=j}^K W_n} \frac{W_s}{\sum_{n=i}^K W_n} \left\{ \prod_{n=t}^{j-1} (1-P_n) \right\} \end{aligned}$$

よって, L_j AS y が ICN を導入したときの, L_j AS x の uphill 方向のフロー流入確率の減少割合 $F_{u,i,j}^{dec}$ は以下ようになる.

$$F_{u,i,j}^{dec} = \neg P_{i,j}^{cc} * P(y \text{ の } CC | x \text{ の非 } CC) * P_{u,i,j}^{path} * Q_{(\sigma_j)} \quad (3.5)$$

3.1.3 トラフィック量の変化からトランジット費の収益への変換

月間のトランジット費 T を、受け取りと、支払いの関係を考慮して、 $T_{i,j}^{pc}$ を、 L_j AS が ICN を導入したときの、 L_i AS がレイヤ $i+1$ の customer AS から受け取るトランジット費、 $T_{i,j}^{cp}$ を、 L_j AS が ICN を導入したときの、各 L_i AS がレイヤ $i-1$ の provider AS へ支払うトランジット費とする。ICN 導入による変化量は (2.2) よりそれぞれ

$$\Delta T_{i,j}^{pc} = 100\{1.08 \times 10^{-5} L d U_1 \Delta F_{i,j}\}^{0.75} g_i^{pc} \quad (3.6)$$

$$\Delta T_{i,j}^{cp} = 100\{1.08 \times 10^{-5} L d U_1 \Delta F_{i,j}\}^{0.75} g_i^{cp} \quad (3.7)$$

となる。ただし F_k は次式で定義される。

$$\Delta F_{i,j} = F_{u,i,j}^{dec} + F_{d,i,j}^{dec} \quad (3.8)$$

以上より、 L_j AS が ICN を導入したときの、 L_i AS の月間のトランジット費の変化量 $\Delta T_{i,j}$ は $\Delta T_{i,j}^{pc} - \Delta T_{i,j}^{cp}$ となり、 L_j AS が ICN を導入したときの、他 AS への影響は $\sum_{j=1}^K \Delta T_{i,j}$ で定量化できる。

3.2 配信遅延時間低減によるユーザからの収益の変化の導出

ICN 導入でユーザにより近い位置からコンテンツを配信できることによって、配信遅延時間の低減が期待できる。配信遅延時間が減少することで、ユーザの満足度が上がり、ユーザの支払い許容額の増加が予想される。今回は、配信時間を図る指標を経由ホップ数とし、経由ホップ数の減少量を求めることで、遅延時間低減による各 AS のユーザからの収益への影響を定量化する。

3.2.1 hop 数の平均減少量の導出

ホップ数は配信時のユーザと CP のレイヤに依存する。ユーザのレイヤを r 、CP のレイヤを s とすると経由ホップ数は $r + s - 1$ で表せられる。ここで、配信フローの経路最上位レイヤが t となる確率 $G_{r,s,t}$ 、 L_k AS に収容された CP とユーザの比率 W_k でそれぞれ重み付けをし、元の経由ホップ数と ICN 導入時の減少経由ホップ数をそれぞれ求める。

3.2.2 hop 数の変化から収容ユーザによる収益への変換

各ユーザから徴収する月間アクセス費を P_r とすると、自身の収容ユーザから月間に受けとるアクセス費 $A_i = P \omega_k U_1$ で表せられる。経由ホップ数を h として、 h のときの、各ユーザが月間に支払うことが許容できる料金の期待値は、 $W(h) = f e^{(-fh)}$ の指数分布に従うとする。 $f = 1$ として、(ICN 導入前のユーザからの収益期待値) - (ICN 導入後のユーザからの収益期待値) によって収容ユーザからの月間アクセス費による収益の変化を求める。

第4章 数値評価

4.1 トランジット費

すべてのレイヤの ICN 普及率を同時に変化させた場合 (P_{all}) の, トランジット費の変化量の変化量を評価する. 図 4.1 に, 新たに ICN を導入したある AS が, L_1 AS, L_2 AS, L_3 AS 3 つの場合について, P_{all} を変化させたときの, 各 i AS の月間のトランジット費の変化量 $\Delta T_{i,j}$ をプロットする. ユーザと CP の総数を各々 $U_1 = 10^9$, $U_2 = 10^4$. また, 各ユーザの月間平均コンテンツ視聴回数を $d = 10$, コンテンツの平均サイズを $L = 3 \times 10^4$ Mbytes に設定する. 総コンテンツ数を $M = 10^6$, 各コンテンツ m の要求比率 q_m を, パラメタ θ の Zipf 分布に従うことを想定し $q_m = (m^\theta \sum_{j=1}^M 1/j^\theta)^{-1}$ とする. 最下位レイヤ L_K AS のキャッシュ容量を $B_K = B_{min}$ に設定し, $\epsilon > 1$ の実数値をとるパラメタ ϵ を用いて, $1 \leq k < K$ の各 k に対して $B_k = \epsilon B_{k+1}$ とし, $\theta = 1$, $B_{min} = 10$, $\epsilon = 5$ に設定する. [13]

いずれのレイヤの ICN 導入時においても, レイヤ 1 の AS は, トラフィック量が減少するため, 受け取るトランジット費が減少し, 収益が減少する. 一方で, レイヤ 2, 3 の AS は収益が増加する. これは, レイヤ 2AS では受け取るトランジット費の減少よりも, 支払うトランジット費の減少量が大きいためであり, レイヤ 3 では, 支払うトランジット費が減少するためである. 自身の CC に含まれる AS が多いため, レイヤ 1 の AS の ICN 導入時が, 他 AS のトランジット費の変化量が最も大きく, 他 AS へ与える影響が大きい. また, ICN が普及するにつれ, 配信経路上ですでに他 AS にキャッシュされているコンテンツが増加するため, 新たな ICN 導入が他 AS へ与える影響は小さくなり, 変化量は小さくなる.

4.2 収容ユーザからの収益

図 4.2 に, 新たに L_1 AS, L_2 AS, L_3 AS がそれぞれ ICN を導入したときの, L_i AS のユーザからの収益の変化量を ΔA_i とし, それぞれプロットする. 各種条件は, 4.1 で述べた値と同値に設定し, 元々の ISP が各ユーザから徴収する月間アクセス費を $P_r = 50$ USD に設定した. [13]

ICN 導入によって, 収容ユーザからの収益は増加するのみで, 減少する AS は無いが, 自身より下のレイヤが ICN を導入しても, 自身の収容ユーザからの収益は増加しない. これは, ICN 導入 AS はトランジット費削減のために, 自身の CC のコンテンツはキャッシュせず, 上位レイヤは下位レイヤのキャッシュの恩恵を受けないためである. また, 各レイヤの AS の収益の変化は, 上位のレイヤほど増加量が大きくなっているが, これは, 自身の収容するユーザ数が多いためである.

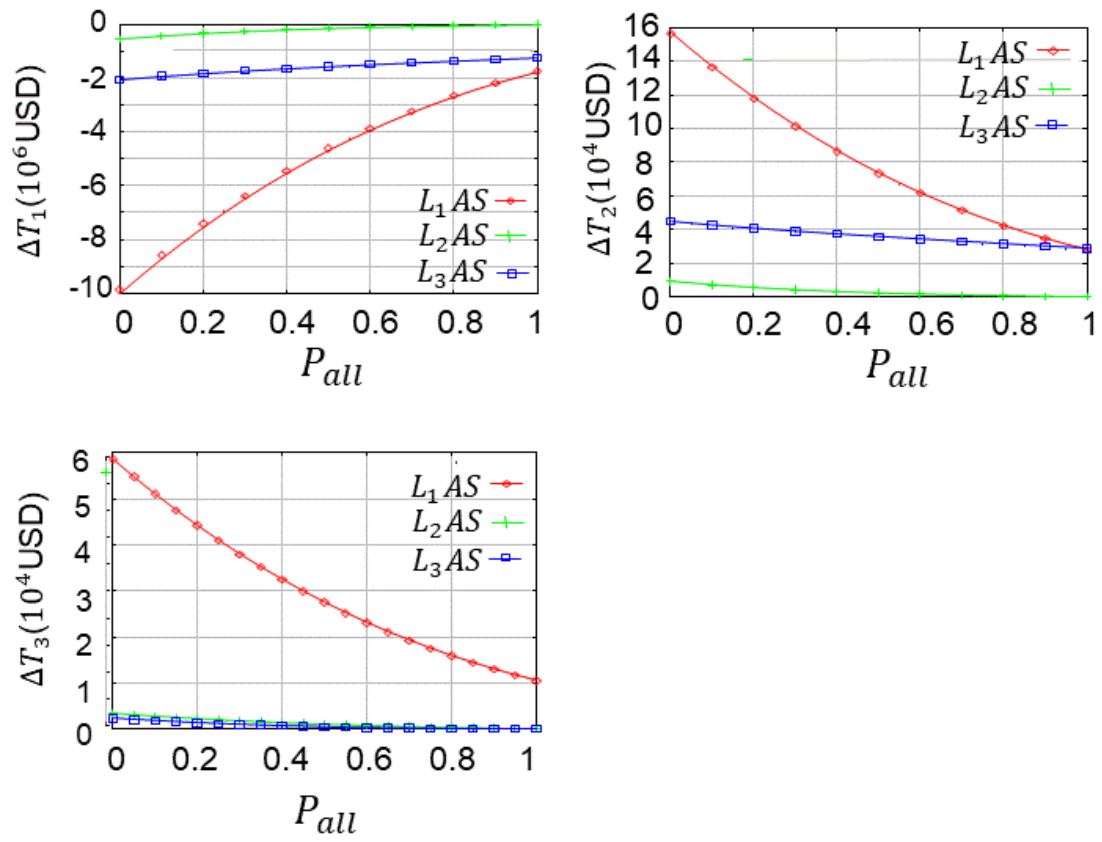


図 4.1: Average change of monthly profit of each AS

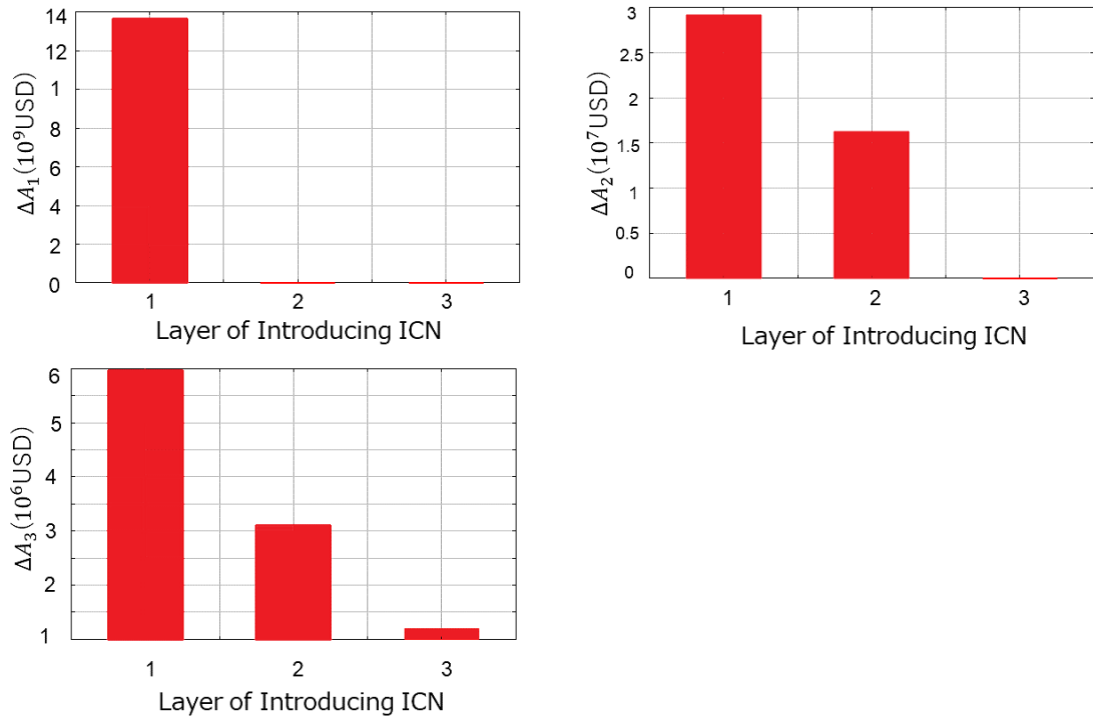


図 4.2: Average change of monthly profit of each AS

第5章 まとめ

これまでの研究では、一部の ISP が ICN を導入した場合の収益に与える影響について分析し、ICN 普及率の増加に伴い、レイヤ 2,3 の収益は増加するが、レイヤ 1 の収益は減少することが分かった。本論では、ある ISP が ICN を導入したときの、他 ISP が受ける影響を分析した。その結果、レイヤ 1 の AS の ICN 導入時が、他 AS へ与える影響が大きいことが分かった。また、ホップ数減少（による配信遅延時間低減）は各レイヤの ISP に対し、少なくとも不利益はなく、一部の ISP に対し収益を増加させることが分かった。ユーザからの収益の増加は、市場への新たな資金の流入であり、ICN 普及の可能性になるといえる。以上から、今後は、レイヤ 1 への ICN 普及を促進する調整金システムを、今回の他 ISP に与える影響を基に検討する。

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] The CAIDA Autonomous System Taxonomy Repository,
<http://www.caida.org/data/as-taxonomy/>
- [2] H. Chang, S. Jamin, and W. Willinger, “To Peer or not to Peer: Modeling the Evolution of the Internet’s AS-level Topology,” IEEE INFOCOM 2006.
- [3] A. Dhamdhere and C. Dovrolis, “Can ISPs be profitable Without Violating “Network Neutrality”?”, ACM NetEcon 2008.
- [4] S. DiBenedetto, C. Papadopoulos, and D. Massey, “Routing Policies in Named Data Networking,” ACM ICN 2011.
- [5] X. Dimitropoulos, et al, “AS Relationships: Inference and Validation,” ACM CCR, Vol.37, no.1, pp.29-40, 2007.
- [6] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, G. Riley, and K. Claffy, “Revealing the Autonomous System Taxonomy: The Machine Learning Approach,” PAM 2006.
- [7] DePeering International, <http://depeering.net>
- [8] L. Gao, “On Inferring Autonomous System Relationships in the Internet,” IEEE/ACM ToN, vol.9, no.6, pp.733-745, Dec. 2001.
- [9] D. Perino and M. Varvello, “A Reality Check for Content Centric Networking,” ACM ICN 2011.
- [10] J. Rajahalme, et al., “Incentive-Compatible Caching and Peering in Data-Oriented Networks,” ACM ReArch 2008.
- [11] R. Stanojevic, I. Castro, and S. Gorinsky, “CIPT: Using Tuangou to Reduce IP Transit Costs,” ACM CoNEXT 2011.
- [12] H. Yu, et al., “Understanding User Behavior in Large-Scale Video-on-Demand Systems,” EuroSys 2006.
- [13] N. Kamiyama, “Analyzing impact of introducing CCN on profit of ISPs” IEEE Trans. Netw. Service Manag., vol. 12, no. 2, pp. 176-187, Jun. 2015.
- [14] 辻香菜, 上山憲昭, “ICN の普及程度が ISP の利益に与える影響の分析” 電子情報通信学会通信 2020 ソサイエティ大会, B-11-9, オンライン, 2020 年 9 月.