

ICN 普及促進のためのナッシュ交渉解を用いた ISP 間の調整金システム

伊藤 柁基[†] 上山 憲昭^{††}

[†] 立命館大学 情報理工学研究科

〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

^{††} 立命館大学 情報理工学部

〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1

E-mail: [†]is0494vk@ed.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし 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、コンテンツ名を主体とした通信である ICN の導入が広く検討されている。ICN の導入に伴い、ISP 間の交流トラフィックが変化するが、ISP はトラフィック量に応じてトランジット費をやり取りしているため、ICN 導入が各 ISP の収益に影響を与える。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 の収益への影響を分析する必要がある。そこで筆者らはこれまでに、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 の収益に与える影響を分析し、ICN 導入を促進するためには、Tier 1 の ISP に対するインセンティブの付与が必要であることを明らかにした。しかしどのようにインセンティブを付与するか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。また、ICN 導入による効率的な配信によって得られる遅延時間低減効果によるユーザからの収益増加効果も考慮する必要がある。そこで、本稿では、階層型 AS トポロジを想定したときの、トランジット費とユーザからの収益の 2 点から、ICN 導入が各 ISP の収益に与える影響を解析的に導出する。そして ICN 普及率を与えたときの AS 間での調整金をナッシュ交渉解を用いて求め、ICN 導入と調整金による収益の変化を導出し、その普及可能性を明らかにする。

キーワード ICN, ISP, 収益, ナッシュ交渉解

Adjusting Payments Among ISPs Using Nash Bargaining Solution for ICN Promotion

Masaki ITO[†] and Noriaki KAMIYAMA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

E-mail: [†]is0494vk@ed.ritsumei.ac.jp, ^{††}kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract The introduction of ICN, which is a content name-based communication, is widely considered as an efficient content delivery method due to the expected rapid growth of traffic volume on the Internet today. The introduction of ICN affects the revenue of each ISP because ISPs exchange transit fees based on the amount of traffic. Since ICN deployment is based on the decision of each ISP, it is necessary to analyze the impact of ICN deployment on revenue of each ISP to clarify the potential for ICN deployment. We have analyzed the impact of the gradual introduction of ICN on the revenue of each ISP in a hierarchical topology structure among ISPs and found that incentives for Tier 1 ISPs are necessary to promote the introduction of ICN. As a system to provide incentives for ICN deployment, it would be effective to create a fund by collecting a portion of revenues from ISPs whose revenues are increasing, and to subsidize ISPs whose revenues are decreasing. It is also necessary to consider the effect of increased revenue from users due to the effect of reduced latency obtained by efficient delivery through the introduction of ICN. Therefore, in this paper, we analytically derive the impact of ICN deployment on the revenue of each ISP in terms of transit cost and revenue from users, assuming a hierarchical AS topology. Then, we use the Nash bargaining solution to find the adjustment fee among ASes given the ICN penetration rate, and derive the change in revenue due to ICN introduction and adjustment fee, and clarify the diffusion potential of ICN.

Key words ICN, ISP, revenue, Nash bargaining solution

1. はじめに

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) が検討されている。

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、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り、遅延時間やネットワーク負荷の軽減が期待できる。ISP (Internet Service Provider) 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、隣接 ISP とのトラフィック量に応じてトランジット費をやり取りしているが、ICN の導入に伴い、ISP 間の交流トラフィックが変化するため、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 の経営判断に基づくため、利益が見込まれない場合、ISP は、ICN を導入しないといえる。よって、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する必要がある。

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 AS (autonomous system) 間のトポロジ構造を対象に、ICN 普及時の各階層の AS の収益を分析し [6] [10] [9], ICN 導入の恩恵が大きいレイヤ 1 の ISP に ICN 導入を促すにはインセンティブが必要であることを明らかにしたが、インセンティブの付与法は未解決である。インセンティブを付与するには、収益が増加する ISP から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。そこで本稿では階層型 AS トポロジを想定し、新たに一定割合の AS が ICN を導入したときの収益の変化を解析的に導出し、適切な調整金のシステムを検討する。

以下、??節で想定条件について述べ、3. 節で AS 間の調整金を導出する。そして 4. 節で数値評価結果を示し、5. 節で全体をまとめる。

2. 想定条件

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 コンテンツ

M 個のコンテンツが全 AS 上で提供され、各コンテンツのサイズは L (Mbytes) で均一とし、各配信要求において各コンテンツ m が一定の確率 q_m で選択されると想定する。 q_m は、パラメタ 1 の Zipf 分布に従うとし、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。

2.2 コスト

ISP はトランジット契約をした customer 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 倍と仮定し [3], 月間のコンテンツ視聴回数を D とすると、 $V = 1.08 \times 10^{-5} LD$ となる [6]。月間のトランジット費 T は、トランジットリンク上の両方向のデータ転送レートの合計値に基づき算出する sum model を想定し [8], T は次式で得られる。

$$T = 100(\kappa LD)^{0.75} \quad (1)$$

ただし $\kappa = 1.08 \times 10^{-5}$ である。また、各 AS は自身の各収容ユーザから定額の料金 C を徴収すると想定し、 C に収容ユーザ数を乗じた A を月間アクセス費として受け取ることができるとする。

2.3 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に分類される。主に上位レイヤ AS が provider としてトランジットサービスを提供し、下位レイヤ AS が customer として対価を支払いトランジットサービス享受する。上位 AS から見たときの両者を接続するリンクを provider-to-customer (p2c) リンクと呼び、下位 AS から見たときには customer-to-provider (c2p) リンクと呼ぶ。つまり、同一のトランジット接続リンクが、一方にとって p2c リンク、他方にとって c2p リンクとなる。一方、トランジット費の支払いが行われないピアリング接続を p2p とし、これは、同階層の AS が接続する際に用いられることが多い。p2c の方向を downhill, c2p の方向を uphill とする。また自身から p2c リンクのみを経由して到達できる全ての AS の集合をその AS の customer cone (CC) と呼ぶ [4]。

各レイヤ k の AS (L_k AS) の数を N_k と定義し、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 リンク数を、それぞれ g_k^{pc} , g_k^{cp} , g_k^{pp} と定義する。図 1 に、本稿で想定する AS 間トポロジモデルを示す。

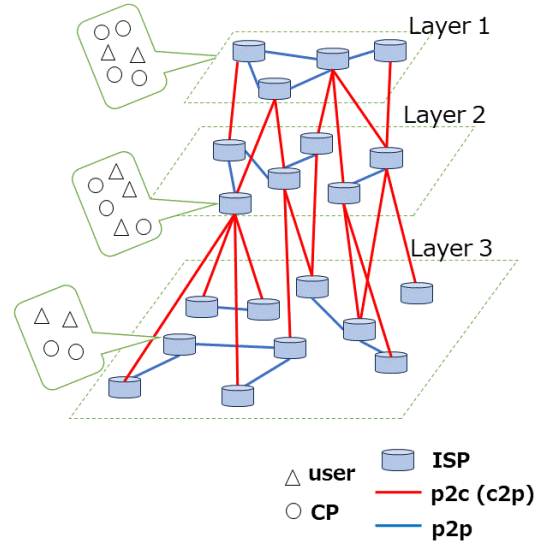


図 1 AS topology model

CAIDA の Web サイト [1] 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 トポロジを階層型のツリー型トポロジでモデル化する [6]。

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 [4] 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 [5] 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

モデル化の結果、レイヤ数 $K=3$ となり、各レイヤ k の AS 数は、 $N_1 = 49$, $N_2 = 2,123$, $N_3 = 2,565$ となり、 g_k^{pc} , g_k^{cp} , g_k^{pp} は、表 1 にまとめたものになる。各 L_k AS は、各 L_{k+1} AS との間にそれぞれ、均一な確率 g_k^{pc}/N_{k+1} でリンクが存在すると仮定する。また同様に、確率 $g_k^{pp}/(N_k - 1)$ で、各 L_k AS 間に p2p リンクが存在すると仮定する。

表 1 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

各 L_k AS に収容される CP とユーザの比率を W_k とする。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。

2.4 キャッシュ設計

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 [7]。またピアリング接続をしている二つの AS 間には、通常、互いのトラフィ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 方向のトラフィック量が増加することから、経路を広告しない。しかし、CC へのユーザや CP 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。

ICN 導入 AS はコンテンツのキャッシュ可否を自由に判断できる。provider AS から c2p リンクを通ったコンテンツをキャッシュすることで、次回以降、provider AS に Interest を転送することなく、自身のキャッシュからコンテンツを配信することができ、トラフィック量、つまりはトランジット費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キャッシュする。一方で、customer AS から p2c リンクを通ったコンテンツ、p2p リンクからのコンテンツは、トランジット費やキャッシュ資源の面で利点がないためキャッシュしない。同様にトランジット費の観点から、各 AS はルーティングにおいて、トランジット費を受け取れる p2c、トランジット費のやり取り無しの p2p、トランジット費を支払う c2p、の接続先順でより優先的に Interest を転送する。つまり、CP から経由最上位レイヤまでは c2p リンクのみを経由し、適宜 p2p リンクを経由した後、p2c リンクのみを経由してユーザへコンテンツを配信することとなる。

また、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、コンテンツ数を単位とした各レイヤ k の AS の全ルータのキャッシュ総容量 B_k のみを考える。同一のレイヤの AS は全て同一の B_k を有するものとし、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ため、各 L_k AS のキャッシュ容量を $B_k < B_{k+1}$ となるよう設定する。その他コスト、AS 間のトポロジや経路広告などのすべてのポリシーは [6] で定義したものを想定する。

3. AS 間の調整金の導出

ある AS が新たに ICN を導入するとき、いくつかのコンテンツは、その ICN 導入 AS から直接配信されるようになり、一部の AS の p2c や c2p リンク上のトラフィック量の減少が予想される。また、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。よって、 L_k AS が得る収益 R_k のうち、ICN 導入の前後で変化のあるのは、トランジット費とアクセス費であり、これらの変化量を定量化することで、必要な調整金を導出する。

3.1 トランジット費

2. 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フィック量を導出する。 L_k AS が ICN を導入している確率を P_k としたときの、配信フローが uphill 方向に通る確率 $F_{u,k}$ と、downhill 方向に通る確率 $F_{d,k}$ は、それぞれ以下ようになる [6] [10]。

$$F_{u,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=k}^K \sum_{t=1}^{k-1} G_{r,s,t} \frac{W_r W_s}{N_k g_k^{cp}} \left[\prod_{n=t}^r (1 - P_n) \right] + \sum_{m=t}^r \prod_{n=t}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q(\sigma_m)\} \quad (2)$$

$$F_{d,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=1}^K \phi_{r,s,k} W_r W_s \left[\prod_{n=k}^r (1 - P_n) \right] + \sum_{m=k}^r \prod_{n=k}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q(\sigma_m)\} \quad (3)$$

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 となる確率であり、 $\phi_{r,s,k}$ は、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である。また、 σ_k は L_k AS のキャッシュの上限である。2.4 節で述べたように、到達性を提供する経路情報交換のため、ICN 導入 AS はコンテンツの重複を回避する。ある L_k AS が ICN を導入している確率は P_k なので、自身を含む $g_k^{pp} P_k + 1$ 個の隣接 AS と重複したキャッシュを回避できるため、ICN 導入 L_k AS の各コンテンツがキャッシュの対象となる確率は、 $\{1 - W_k/N_k (g_k^{pp} P_k + 1)\} / (g_k^{pp} P_k + 1) = 1 / (g_k^{pp} P_k + 1) - W_k/N_k$ となり、キャッシュの上限 σ_k が仮想的に大きくなり、以下のように表せられる。

$$\sigma_k = \frac{B_k}{\frac{1}{g_k^{pp} P_k + 1} - \frac{W_k}{N_k}} \quad (4)$$

これらと (1) から、各 L_k AS がレイヤ $k+1$ から受け取るトランジット費 T_k^{pc} と、レイヤ $k-1$ へ支払うトランジット費 T_k^{cp} はそれぞれ、

$$T_k^{pc} = 100 \{ \kappa L d U_1(F_{u,k+1} + F_{d,k+1}) \}^{0.75} g_k^{pc} \quad (5)$$

$$T_k^{cp} = 100 \{ \kappa L d U_1(F_{u,k} + F_{d,k}) \}^{0.75} g_k^{cp} \quad (6)$$

となり、 P_k を変化させた前後の値を比較することで、それぞれの変化量を導出する。ただし d は各ユーザの月間平均コンテンツ視聴回数である。

3.2 アクセス費

配信遅延時間を経由ホップ数で考え、 L_r AS 収容ユーザからコンテンツまでの経由ホップ数が n である確率 $H_{r,n}$ を導出する。ただし簡単のために、AS 内のトポロジ、各ルータは考慮せず、各 AS 間で 1 ホップとする。

3.2.1 経由ホップ数

自身の CC に対して、インターネットの到達性を確保する義

務があるため、最上位レイヤの全 L_1 AS 間では、完全に経路情報が交換される。そのためレイヤ 1 では、単一の AS^(注1)、もしくは p2p リンクを用いて複数回 AS を経由する。一方で、最上位でないレイヤは、収益の面で利点がないため、単一の AS、もしくは p2p リンクを用いて 1 回のみ AS を経由すると考えられる。最上位経由レイヤ t で、p2p リンクを用いて AS を n 回経由する確率を $h_{t,n}^{pp}$ とすると、単一の AS (自 AS) が選択される確率 $h_{t,0}^{pp}$ は $1/N_t$ である。また、 $t = 2, 3$ のとき $h_{t,1}^{pp} = 1 - 1/N_t$ である。一方で、 $t = 1$ のときは複数回経由することを考慮する必要がある。1 回のみ p2p リンクを用いて AS を経由するのは、目的となる AS が自 AS と p2p リンクを持つ場合であり、2 回 p2p リンクを用いて AS を経由するのは、1 回目で経由できる AS の中で 1 つ以上の AS と p2p リンクを有する場合である。目的となる AS と p2p リンクを持つかは、一般的なくじ引きの問題をあてはめて考えると、 a 個のくじの中で、あたりが b 個あり、 c 回、くじを引いてどれか一つでも当たればよい確率に相当し、当たりを 1 つも引かない確率の余事象を考えると、

$$1 - \frac{\prod_{i=0}^{b-1}(a-c-i)}{\prod_{i=0}^{b-1}(a-i)} \quad (7)$$

となる。ここで $h_n^{pp}(n>0)$ について考えると、
 a : 残りの AS 数 ($N_1 - h_{n-1}^{pp} * N_1$)
 b : $n - 1$ 回目の経由 AS の候補数 ($h_{n-1}^{pp} * N_1$)
 c : c2p リンク数 (g_1^{pp})
 であり、次式で得られる。

$$h_{1,n}^{pp} = 1 - \frac{\prod_{i=0}^{h_{1,n-1}^{pp} N_1 - 1} (N_1 - h_{1,n-1}^{pp} N_1 - g_1^{pp} - i)}{\prod_{i=0}^{h_{1,n-1}^{pp} N_1 - 1} (N_1 - h_{1,n-1}^{pp} N_1 - i)} \quad (8)$$

次に、p2c、c2p リンクを用いたレイヤ間の経由ホップ数は、ユーザのレイヤ r 、CP のレイヤ s 、最上位経由レイヤ t から、

$$r + s - (2t - 1) \quad (9)$$

で得られる。また、コンテンツが ICN 導入 AS によりキャッシュされている場合、いくつかのコンテンツはその AS から直接配信されるようになり、経由ホップ数が変化する。ただし、すでに経路上の下位レイヤ AS でキャッシュされているコンテンツが要求されたとき、上位レイヤは影響を与えない。よって、 L_k AS でキャッシュされる確率 p_k は、 $k < K$ のとき、

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \prod_{n=k}^K (1 - P_{n+1} Q(\sigma_{n+1})) \quad (10)$$

で得られ、 $k = K$ のときは次式で得られる。

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \quad (11)$$

以上のことから、 $H_{k,n}$ の確率分布が以下のようになれる。

$$H_{r,n+r+s-(2t-1)} = h_{r,n}^{pp} G_{r,s,t} W_s \prod_{k=1}^{\max(r,s)} (1 - p_k) \quad (12)$$

$$H_{r,r-k} = p_k \frac{1}{g_k^{pp} + 1} \quad (13)$$

$$H_{r,r-k+1} = p_k \frac{g_k^{pp}}{g_k^{pp} + 1} \quad (14)$$

3.2.2 上昇期待値

ユーザの配信遅延に対する感応度を S で定義し、配信経路の経由 AS 数が 1 ホップ減少するごとにユーザからの収益が $S\%$ 上昇するとする。 $H_{k,n}$ による確率分布から求めた ICN 導入前と導入後のホップ数の期待値をそれぞれ $h(k)$ 、 $h'(k)$ とすると、ユーザからの L_k AS の収益の上昇率期待値 E_k は、

$$E_k = 1 + S(h(k) - h'(k)) \quad (15)$$

となり、ICN 導入後の新たな各 L_k AS のユーザからの月間アクセス費 A_k は次式で表される。

$$A_k = E_k C U_1 W_k \quad (16)$$

3.3 ナッシュ交渉解

T は一方の利益が一方の損失となるゼロサムゲームであるが、 A は市場への新たな資金の流入である。そのため、各 ISP は自身の利益を考慮して行動するが、AS 間の協力、つまり ICN の導入でより大きな収益を得ることができる。ところで協力して得た成果の合理的な分配法として、両者の効用を最大化する合意であるナッシュ交渉解が知られている。そこで本稿でも分配額をナッシュ交渉解で得るため、基準となる ICN 導入前の収益から、ICN 導入による収益 (利得) 増加分の積を最大化する点を求め、AS 間の調整金を導出する。3.1 節と 3.2.2 節から、 L_k AS の R_k 収益 (USD) は

$$R_k = T + A = T_k^{pc} - T_k^{cp} + A_k \quad (17)$$

で得られる。

ICN 導入前後の L_k AS の収益変化量を ΔR_k とする。全 L_j AS から全 L_k AS へ受け渡す金額の合計を調整金 $x_{k,j}$ ($k < j$) とし、ナッシュ交渉解によって、効用 $\Delta R_k + x_{k,j}$ と $\Delta R_j - x_{k,j}$ の積を最大化する $x_{k,j}$ を求める。積が最大になるのは $\Delta R_k + x_{k,j} = \Delta R_j - x_{k,j}$ のときなので、 $x_{k,j}$ は、

$$x_{k,j} = \frac{\Delta R_j - \Delta R_k}{2} \quad (18)$$

となる。

4. 数値評価

4.1 評価条件

各 L_k AS に収容される CP とユーザの比率 W_k を、 $W_1 = 0.460$ 、 $W_2 = 0.426$ 、 $W_3 = 0.114$ に設定する [6]。ISP が各ユーザから徴収するもとのアクセス費を $A_k = 50$ USD、ユーザの総数を $U_1 = 10^9$ 、CP の総数を $U_2 = 10^4$ とし、各ユーザの月間平均コンテンツ視聴回数を $d = 10$ とする。また、コンテンツの総数を $M = 10^6$ とし、各コンテンツの要求比率をパラメタ 1 の Zipf 分布に設定する。

4.2 ユーザ感応度が AS の収益変化に与える影響

ICN が未導入の状態から、すべての L_1 AS が ICN を導入したときの各 L_k AS 全体のトランジット費の変化量 ΔT_k 、アクセス費の変化量 ΔA_k 、収益の変化量 ΔR_k をそれぞれ導出した。すなわち L_1 AS のみの ICN 普及率 P_1 を 0 から 1 へ変化させ、その前後の各レイヤの AS の収益変化量を評価する。図 2 に、感応度 S に対して ΔT_k と ΔA_k をプロットする。 S を変化させたとき、 ΔT_k は一定であるが、 L_1 AS が ICN を導入することで、リンク間を流れるトラフィック量が減少し、 L_1 AS のトランジット費 T_1 は減少し、 T_2 、 T_3 は増加する。一方で ΔA_k はすべてのレイヤで正の値であり、各 A_k は S の増加に伴い単調に増加する。次に、図 3 に、感応度 S に対して ΔR_k をプロットする。 ΔR_k の符号から、 S が十分に小さいとき、トランジット費と同様に、 L_1 AS の収益は減少する反面、 L_2 と L_3 AS の収益は増加する。一方 S が大きいときは、すべてのレイヤで、ホップ数の減少による A の増加効果が大きく、ICN 導入で L_1 AS の収益も増加する。

これら結果から、 $\Delta R_1 < 0$ である S の値では、ICN 普及のためには、インセンティブが必要である。一方でレイヤ 1 の収益が正の値であるとき、レイヤ 1 の ISP は自然に ICN を導入するため、インセンティブは必要ない。

(注1)：この場合、p2p リンクを用いないで CC へ折り返す。

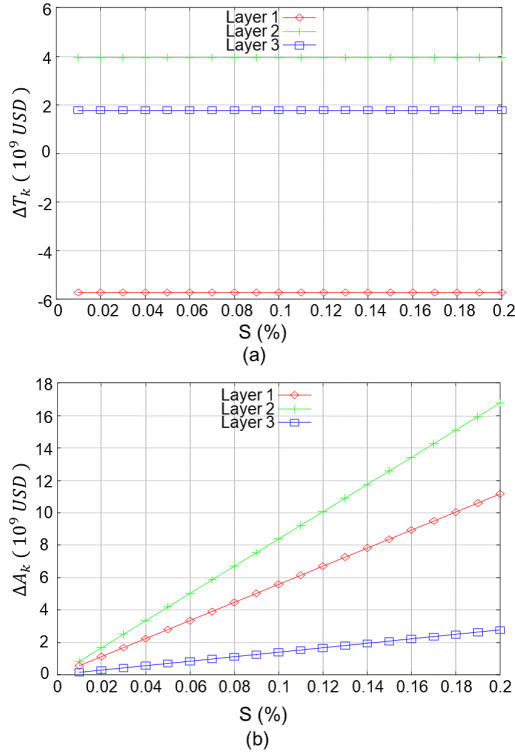


図 2 Change of (a) transit fee and (b) access fee of each AS in each layer against S , sensitivity of users for delay, when only L_1 ASes introduce ICN

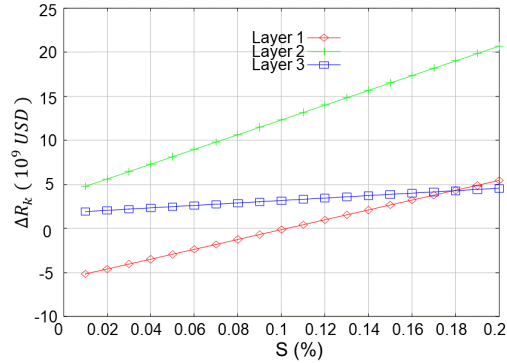


図 3 Change of revenue of each AS in each layer against S , sensitivity of users for delay, when only L_1 ASes introduce ICN

4.3 調整金

各レイヤの AS の ICN 普及率が、全 L_j AS から全 L_k AS へ支払う調整金 $x_{k,j}$ に与える影響を分析する。 $\Delta R_1 < 0$ で、ユーザからの収益の変化が大きい $S = 9$ に設定する。図 4(a)(b) に、 P_2 と P_3 を 0, 0.5, 1.0 の各々に固定的に設定し、 P_1 のみを 0 から 1 の範囲で変化させたときの $x_{1,2}$ と $x_{1,3}$ を P_1 に対してプロットする。 P_1 の増加に伴い $x_{1,2}$ は増加することから、 L_1 AS の ICN 普及率増加に伴い、 L_2 AS が L_1 AS に支払うトランジット費が減少し、またアクセス費が増加することから、 L_1 AS が ICN を導入することによる L_2 AS の収益増加効果が増加し、その結果、 L_2 AS から L_1 AS へ支払われる調整金も増加する。他 ISP の ICN 普及率 P_2 や P_3 の増加に伴い、 $x_{1,2}$ は減少するが、すでに L_2 AS や L_3 AS でキャッシュされているコンテンツが多くなり、 L_1 AS の ICN 導入の他レイヤ AS に対する恩恵が減少することが理由と考えられる。また、 $x_{1,3}$ は、 P_2 と P_3 が 1.0 のとき負の値となり、 L_1 AS から L_3 AS へ調整金が支払われることになるが、同様の理由で L_1 AS の ICN 導入の L_3 AS に対する恩恵が減少し、 ΔR_1 が ΔR_3 を上回ったためであると考え

られる。

図 4(c)(d) に同様に、 P_2 のみを 0 から 1 まで変化させたときの $x_{1,2}$ と $x_{2,3}$ を P_2 に対してプロットする。図 4(a) と同様の傾向が確認でき、 P_2 の増加に伴い $x_{1,2}$ が増加する。 L_2 AS の ICN 普及率が高いほど、 L_1 AS の受け取るトランジット費が減少することによる収益減少と、 L_2 AS の支払うトランジット費の減少かつ受け取るアクセス費の増加による収益増加が理由であると考えられる。また L_2 AS が L_3 AS から受け取る調整金は負の値となっているが、レイヤ 2 と 3 の AS の収容ユーザ数の違いにより、図 3 から確認されるように、 ΔR_2 が ΔR_3 を上回ったためと考えられる。

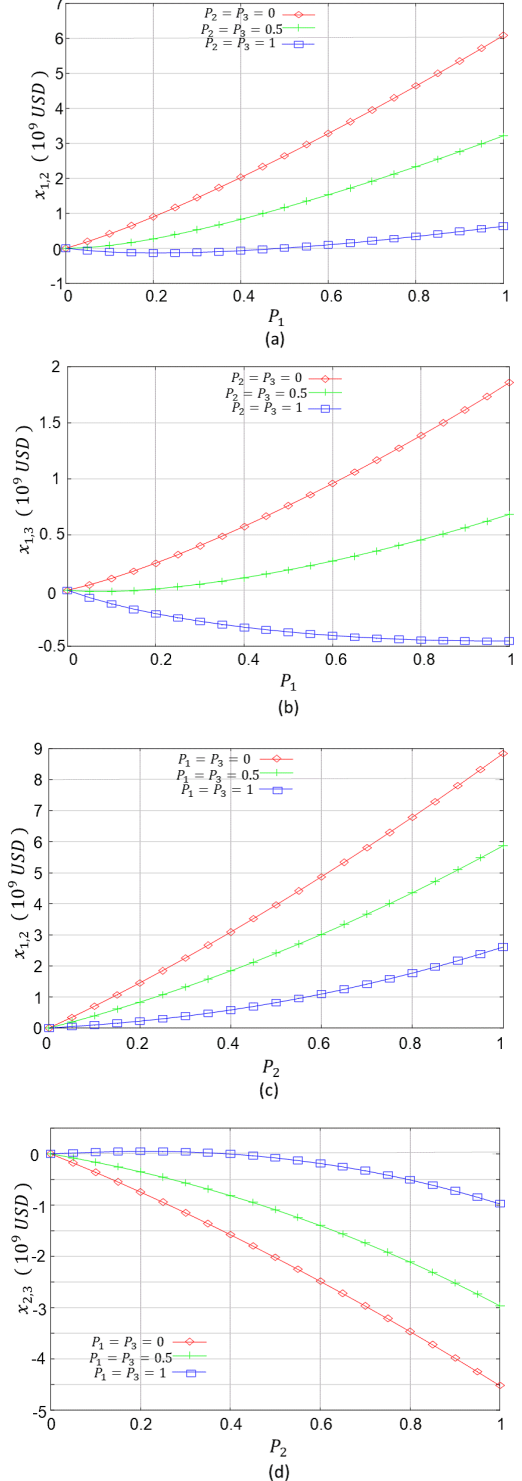


図 4 Amount of adjusting payment between ASes of different layers against ICN penetration ratio of layer 1 or layer 2 ASes

次に $S = 9$ で、 P_1, P_2, P_3 を同時に変化させた場合 ($P_1 = P_2 = P_3 = P_{all}$) の $x_{k,j}$ を図 5 に示す。 $x_{1,2}, x_{1,3}, x_{2,3}$ は、それぞれ P_1, P_2 のみを変化させたときと同様の傾向が見られた。 $x_{1,2}, x_{1,3}$ は正の値で単調に増加し、 $x_{2,3}$ は負の値で単調に減少する。一方で、 P_1, P_2 のみを変化させたときは、これらの増加に伴い調整金の増加量が増加したのに対し、 P_{all} を変化させた場合は、調整金の増加量は減少する。これは前者の場合は、自身を含む $g_k^{PP} P_k + 1$ 個の AS と重複したキャッシュを回避できるため、同レイヤがより ICN を導入する場合に仮想的にキャッシュ容量が大きくなる恩恵を受けやすくなる半面、後者の場合は、すでに経路上の AS でキャッシュされているコンテンツが要求されたときに、新たな ICN 導入は影響を及ぼさないためと考えられる。

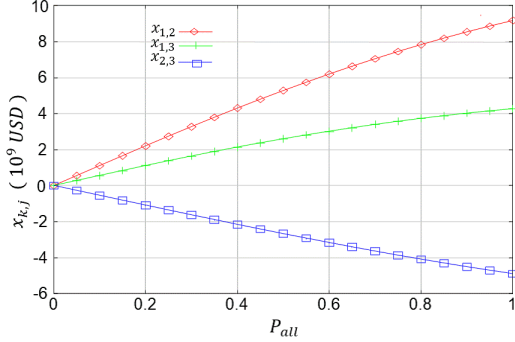


図 5 Amount of adjusting payment with identical ICN penetration ratio among all layers

最後に、ICN 導入前と比較した、ICN 導入後の調整金の収受を行ったときの各 L_k AS の収益の変化量 $\Delta R'_k$ を、図 6 に示す。やはりすべてのレイヤの AS の ICN 普及率を同じ値で変化させた。全 L_k AS で $\Delta R'_k > 0$ となり、全レイヤで ICN の普及が進むといえる。一方で、 $\Delta R'_2$ が極端に小さい。これは、図 5 から分かる通り、 L_2 AS は L_1 AS と L_3 AS のどちらにも調整金を支払う関係にあるためと考えられる。

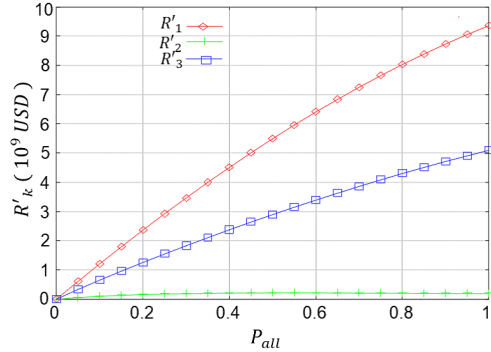


図 6 Change of revenue obtained by introducing ICN with adjusting payments with identical ICN penetration ratio among all layers

そこで、 $x_{1,2}, x_{1,3}$ の収受後を基準に $x_{2,3}$ を求め、 $\Delta R'_k$ を導出した。結果を図 7 に示す。基準 (交渉順) を変更したことで、レイヤ 2 からレイヤ 3 に渡す調整金 $x_{2,3}$ が減少し、先に比べて $\Delta R'_2$ が増加し、 $\Delta R'_3$ が減少した。調整金を支払う側が不利であったことが改善できた点では、公平性が向上したといえるが、一方で、交渉順でも有利不利が現れるといえ、何らかの形で交渉力を定量化し、考慮していく必要があると考える。

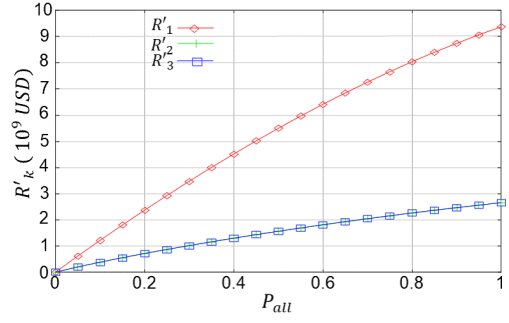


図 7 Change of revenue obtained by introducing ICN with adjusting payments with identical ICN penetration ratio among all layers when changing negotiation order

5. まとめ

効率的なコンテンツ配信として、コンテンツ名を主体とした通信である ICN が検討されている。本稿では AS 間のトポロジを 3 階層でモデル化し、ICN の普及時において、ICN を導入したときの各 ISP の収益に与える影響を分析するため、トランジット費とユーザからのアクセス費の 2 点について導出した。ユーザからのアクセス費は、配信遅延時間低減により上昇するものとし、その感応度により、各レイヤの AS の収益は変化する。今回のモデルでは、レイヤ 1,2 の収容ユーザの比率が大きいため、レイヤ 1,2 の収益が増加しやすい構造であったといえる。また、ナッシュ交渉解を用いたときの ISP 間での調整金を導出した。おおよそ ICN 導入によって変化した収益部分の折半となり、レイヤ 2 の AS の収益が増加しやすい構造から、レイヤ 2 の AS が他レイヤの AS に対して支払う形となった。最後に導出した調整金の収受によっての収益の変化を導出した。交渉順によっても結果が異なるが、全レイヤで収益が正の値であることが確認できたため、ICN 普及の手がかりとなるといえる。

今後は、現実的な状況により近くするために、レイヤごとに ICN 普及の方法を変更し同様に数値評価を行う。また、交渉順でも有利不利が現れることから、何らかの形で交渉力を定量化し、考慮していく。さらには、実際のトポロジを対象として、同様のインセンティブメカニズムが実現可能かも評価していきたい。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 21H03436 と 21H03437 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] 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] X. Dimitropoulos, et al, "AS Relationships: Inference and Validation," ACM CCR, Vol.37, no.1, pp.29-40, 2007.
- [5] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, G. Riley, and K. Claffy, "Revealing the Autonomous System Taxonomy: The Machine Learning Approach," PAM 2006.
- [6] 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.
- [7] J. Rajahalme, et al., "Incentive-Compatible Caching and Peering in Data-Oriented Networks," ACM ReArch 2008.
- [8] R. Stanojevic, I. Castro, and S. Gorinsky, "CIPT: Using Tuangou to Reduce IP Transit Costs," ACM CoNEXT 2011.
- [9] 伊藤証基, 上山憲昭, "ICN 導入が他 ISP の利益に与える影響の分析", 信学会 2023 年総合大会, B-6-22
- [10] 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", 信学会 2020 ソ大会, B-11-9