

ICN 普及のための協力ゲームに基づく ISP 間調整金システム

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 が検討されている。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の低減によるユーザからの収益の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 間での調整金を協力ゲームを用いてそれぞれ求め、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, 協力ゲーム

Adjustment Payment System Among ISPs Based on Cooperative Games 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 cooperative game 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, cooperative game

1. はじめに

現在のインターネットでは、IP アドレスを用いてサーバがク

ライアントヘルータを用いてパケットを転送する。そのため各通信に際して、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、動画などの大容量リッチコンテンツ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、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を行う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。

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] [9] [10], 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。そこで著者らは、収益の合理的な分配法として知られるナッシュ交渉解を用いて調整金を導出した [11]。しかし 3 者以上のプレイヤー間におけるナッシュ交渉解を用いた収益分配は未検討である。また協力ゲームにおける合理的な収益配分法としては、シャープレイ値やコアなど、他の方法も知られている。そこで本稿では、これら様々な収益配分法を ICN の調整金システムに用いた場合の収益配分の特徴を解析的に分析する。

以下、2. 節で想定条件について述べ、3. 節で AS 間の収益変化量を解析的に導出する。そして 4. 節で協力ゲームを用いた合理的な調整金の設定法を提案し、5. 節で数値評価結果を示し、6. 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。また、表 1 に本稿で用いた変数をまとめる。

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。各コンテンツの ID を 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

表 1 Summary of variables

Variable	Semantics
A_k	L_k AS のユーザからの月間アクセス費
B_k	L_k AS のキャッシュ総容量
σ_k	L_k AS のキャッシュ上限
C	1 ユーザの AS に支払う定額の料金
D	月間のコンテンツ視聴回数
d	各ユーザの月間平均コンテンツ視聴回数
E_k	L_k AS のアクセス費上昇期待値
$e(N, x)$	分配 x に対する提携 N の不満
$F_{u,k}$	配信フローが uphill 方向にリンクを通る確率
$F_{d,k}$	配信フローが downhill 方向にリンクを通る確率
g_k^{pc}	L_k AS の平均 p2c リンク数
g_k^{cp}	L_k AS の平均 c2p リンク数
g_k^{pp}	L_k AS の平均 p2p リンク数
$G_{r,s,t}$	ユーザがレイヤ r 、CP がレイヤ s のとき、 配信フローの最上位経由レイヤが t となる確率
$\phi_{r,s,k}$	ユーザがレイヤ r 、CP がレイヤ s のとき、 c2p リンクを配信フローが通る確率
$H_{k,n}$	L_k 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
$h_{t,n}$	最上位経由レイヤ t で p2p リンクを n 回経由する確率
K	AS 間トポロジモデルのレイヤ数
κ	定数 (1.08×10^{-5})
L	各コンテンツのサイズ
M	コンテンツの総数
N_k	レイヤ k の AS 数
P_k	L_k AS が ICN を導入している確率
$Q_{G,m}$	q_m の累積分布
q_m	配信要求において、コンテンツ m が選択される確率
R_k	L_k AS の収益
S	経由ホップ数の減少によるアクセス費の上昇率
T	月間のトランジット費
T_k^{pc}	各 L_k AS が受け取るトランジット費
T_k^{cp}	各 L_k AS が支払うトランジット費
U_1	ユーザの総数
U_2	CP の総数
V	データ転送レート
$v(N)$	提携 N によって得られる利得を表す特性関数
W_k	L_k AS に収容されている CP とユーザの比率
x_k	L_k AS に分配される収益

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を楽しむ. 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.

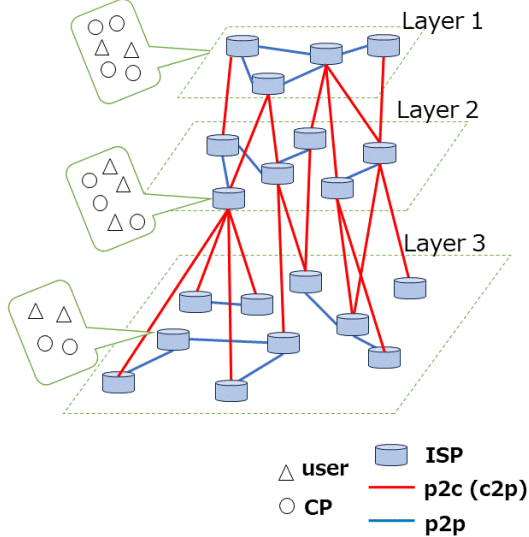


図 1 AS topology model

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 2 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 2 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 から経路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. 各 AS の収益変化量の導出

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 導入の前後で変化す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 としたときに、配信フローがある AS 間リンクを uphill 方向に通る確率 $F_{u,k}$ と、downhill 方向に通る確率 $F_{d,k}$ は、それぞれ次式で得られる [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、配信フローの経路最上位レイヤが 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

配信遅延時間を経路ホップ数で考え、 L_r AS 収容ユーザからコンテンツまでの経路ホップ数が 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 経路ホップ数

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、最上位でないレイヤの AS は収益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。最上位経路レイヤ 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、あたりを 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路ホップ数は、ユーザのレイヤ r 、CP のレイヤ s 、最上位経路レイヤ 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、経路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得られる。

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

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

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

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、配信経路の経路 AS 数が 1 ホップ減少することにより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、

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

(注1) : この場合、p2p リンクを用いないで CC へ折り返す。

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 特性関数形ゲーム

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。各 ISP は自身の利益を考慮して行動するが、AS 間の協力、つまり全レイヤ AS の ICN の導入で、全体としてより大きな収益を得ることができる。そこで本稿では、協力して得た利益の分配の仕方について、協力ゲームの 1 つである特性関数形ゲーム (N, v) として分析する。各レイヤの収益の合計で考えて、プレイヤー数はレイヤ数である。その集合を $N = \{1, 2, 3\}$ 、ICN 導入を提携とし、提携は N の部分集合となる^(注2)。特性関数をそれぞれ $v(i) = \Delta R_i$ 、 $v(i, j) = \Delta R_i + \Delta R_j$ 、 $v(i, j, k) = \Delta R_i + \Delta R_j + \Delta R_k$ とする。ただし ΔR_i は ICN 導入前後の L_i AS の収益変化量で、3.1 節と 3.2 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。

4. 協力ゲームを用いた合理的な調整金の設定法

本節では前節で導出した各 AS の収益変化量を用いて、協力ゲームの合理的な収益配分法として知られるナッシュ交渉解、およびシャープレイ値を用いた調整金の設定法を提案する。

4.1 三者間ナッシュ交渉解に基づく調整金設定法

まず、合理的な分配法として、両者の効用を最大化する合意案であるナッシュ交渉解が挙げられる。基準となる協力しないとき (ICN 導入前) の収益から、3 者協力 (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。求まる解を L_k AS への分配 x_k とする。 x_k は、 $(x_1 - R_1)(x_2 - R_2)(x_3 - R_3)$ を最大化し、全体合理性 $x_1 + x_2 + x_3 = v(1, 2, 3)$ を満たすため、

$$x_k = \frac{v(1, 2, 3) - R_1 - R_2 - R_3}{3} + R_k \quad (18)$$

で求められる。

4.2 シャープレイ値に基づく調整金設定法

今回の場合、2 者での提携でもある程度の利益が得られ、ナッシュ交渉解が最適解になるとは限らない。そのため、新たに AS が提携に加わったときに、そのレイヤ AS がどれだけ利得の増加に貢献したかを表す限界貢献度から、それぞれの平均をとるシャープレイ値を求め、貢献度に応じた AS 間の調整金を導出する。各提携への参加は一律な確率であるとし、

$$x_k = \frac{2\{v(i, j, k) - v(i, j)\} + v(i, k) - v(i)}{6} + \frac{v(j, k) - v(j) + 2v(k)}{6} \quad (19)$$

と求められる。

5. 数値評価

5.1 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 $C_k = 50$ 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。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。また [9] より $\Delta R_1 < 0$ であるが、特に断らない限りユーザからのアクセス費の増加量が大きい $S = 9$ に設定する。

5.2 三者間ナッシュ交渉解による調整金設定

図 2 に、すべてのレイヤの AS の ICN 導入比率 (P_{all}) に対し、(a) 各レイヤ $k(L_k)$ の AS の収益分配 x_k と、そのときに (b) 調整金として受け取る金額 y_k をプロットする。図 2(a) より、全てのレイヤの AS とも等しい収益分配となり、ナッシュ交渉解を用いて調整金を設定することで、ICN 導入による収益増加分の合計を均等に AS に割り振る結果となることが確認できる。また ICN 普及率が増加することで、全体の利得 $v(1, 2, 3)$ は大きくなるため、それぞれの分配額も増加する。すべての場合で $x_k \geq 0$ であり、ナッシュ交渉解による分配を行うとき、 L_1 AS は ICN を導入するといえる。図 2(b) から、主に L_2 AS から L_1 AS へ調整金の受け渡しが行われており、その額も大きいことが確認できる。

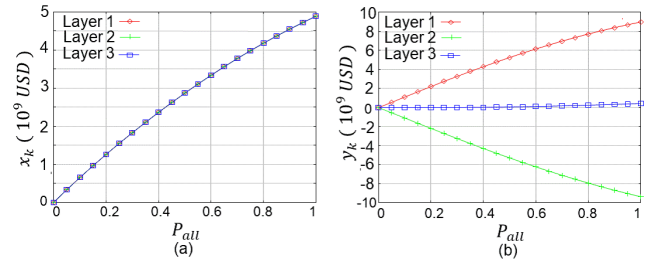


図 2 (a)Revenue distribution to each AS and (b)adjustment received by each AS using Nash bargaining solution

5.3 シャープレイ値による調整金設定

図 3 に、同様に P_{all} に対し (a) x_k と (b) y_k をプロットする。図 3(a) から、提携に加わることで利得の増加が大きい AS が、より多くの分配を得ている。ICN 普及率の増加により全レイヤの収益の合計は増加しており、調整金無しの場合で見られる L_1 AS の収益の減少を抑えられている。一方で $P_{all} > 0.9$ のとき $x_1 < 0$ であり、 L_1 AS には ICN を導入するメリットがない。図 2(b) から、 L_1 AS が L_2 AS と L_3 AS から調整金を受け取ることが確認できる。また、調整金の額は普及率の増加に伴い増加するが、普及率が高くなるほど増加率の変化量は小さくなる。これは ICN 普及に伴い、すでにキャッシュされているコンテンツが多くなることで、新たな ICN 導入による恩恵が小さくなるためである。

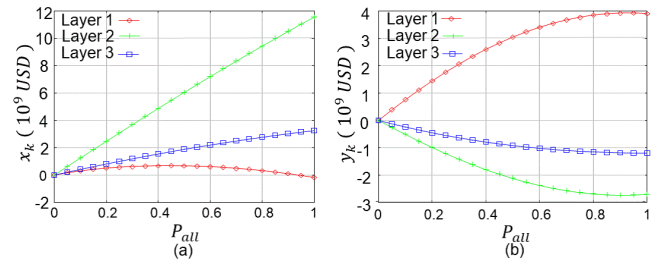


図 3 (a)Revenue distribution to each AS and (b)adjustment received by each AS using Shapley value

5.4 各提携の不満

ナッシュ交渉解やシャープレイ値は、分配案を一意に求めるものであり、実際の展開で合意される案であるとは限らない。

(注2) : 1 と 2 の提携時、ICN 導入レイヤは 1 と 2 である

そのため、特性関数形ゲーム (N, v) の、 $v(1, 2, 3)$ の分配 x に対する各提携の不満を

$$e(N, x) = v(N) - \sum_{k \in N} x_k \quad (20)$$

として、前述の2解それぞれの分配に対する各提携の不満を導出する。不満 $e(v, x)$ が正の値であるとき、その提携は自身らのみの方がより多くの利得が得られることを意味し、提携合理的でなく、3者での協力を実現することは難しいといえる。図4に、 P_{all} に対し、(a)3者間ナッシュ交渉解での不満 $e(v, x)$ と、(b)シャープレイ値で求めた分配に対しての不満 $e(v, x)$ を各々プロットする。図4(a)から、調整金を受け取る L_1 AS が関わる提携の不満は負の値で小さくなっており、多くの余剰があるといえる。一方で、調整金を支払う関係にあった L_2 AS が関わる提携の不満が正の値で大きく、分配に対して不満を持つことが確認できる。図4(b)では、すべての提携において不満が負の値であり、今回のシャープレイ値での分配は、合理的で安定した分配といえる。

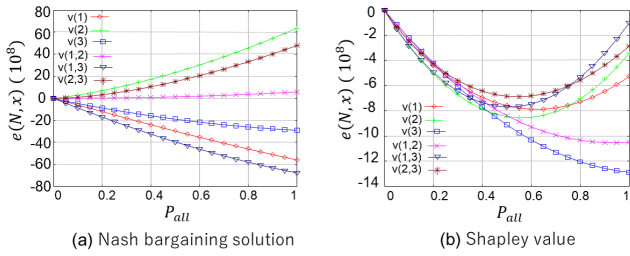


図4 Dissatisfaction with revenue adjustment by (a) Nash bargaining solution and (b) Shapley value

5.5 コア

先述のような、提携が合理的で安定した分配の集合をコアといい、今回の特性関数形ゲームではコアは存在するといえる。さらには、今回の特性関数形ゲームでは、シャープレイ値はコアに含まれるといえる。すべての提携において不満が負の値であるとき、コアは存在するため、コアの存在条件は

全体合理性 : $x_1 + x_2 + x_3 = v(1, 2, 3)$

個人合理性 : $x_k \geq v(k)$

部分提携時の条件 : $x_j + x_k \geq v(j, k)$

のすべてを満たす x が存在するときである。これまで $S=9$ で、ICN 導入でユーザからのアクセス費が増加しやすい構造で評価を行ってきたが、実際にはアクセス費が増加しにくい場合も考えられる。図5に (a) $S=6$, (b) $S=3$ のときのシャープレイ値による分配の各提携の不満 $e(v, x)$ をプロットする。 S が小さくなるにつれ余剰が小さくなり、各提携の不満が大きくなる。さらには不満が正の値になる提携が見られるようになり、このときシャープレイ値はコアに含まれない分配で、全体提携は不安定であるといえる。

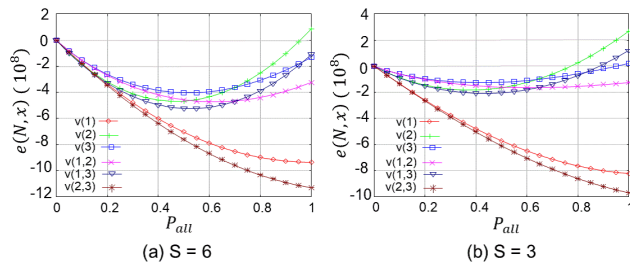


図5 Dissatisfaction with revenue adjustment by Shapley value when (a) $S=6$ and (b) $S=3$

6. 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を解析的に導出した。ユーザからのアクセス費は配信遅延時間の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。市場全体ではユーザからのアクセス費増加により、収益が増えることから協力ゲームとして見立て、3者間ナッシュ交渉解、シャープレイ値を利用し、それぞれの場合の調整金を求めた。その時の分配に対しての各提携の不満を求め、各 L_k AS の提携が安定かどうかを確認した。また、ユーザからの収益の増加が小さい場合でも、安定的な分配が可能かを検討した。

ナッシュ交渉解は、利得増加分を均等に分配する形で平等な分配法といえる。ナッシュ交渉解による分配を行うとき、 L_1 AS の収益は増加するため、ICN の普及可能性がある。一方で、このときの分配に対して不満をもつ部分提携が存在することから、協力は不安定であることが分かる。また、シャープレイ値は、各 L_k AS の限界貢献度に応じた分配で、より平等な分配である。シャープレイ値による分配を行うとき、 L_1 AS の収益は一部で負の値になるため、ICN の完全な普及可能性は検討する必要がある。また分配に対して不満をもつ部分提携は存在せず、協力は安定的である。このような安定的な分配の集合がコアであるが、ユーザからの収益の増加が小さい場合には、必ずしも分配はコアに含まれない、または、コアが存在するか検討する必要がある。

以上から今後は、各提携の不満の最大値を最小化し、ただ一つの分配案に決められる解である“仁”を求めることで、できるだけ全体提携が安定的になる AS 間の調整金を導出する予定である。また、コアの存在しない場合においても、どれだけの余剰があれば提携が合理的であるかを考え、様々な条件での普及可能性を検討していく。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 23K21664 と 23K21665 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, 2023 年 3 月
- [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, 2020 年 9 月
- [11] 伊藤 証基, 上山 憲昭, “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”, IA 研究会, IA2023-79, 2024 年 3 月