

ICN 普及のための協力ゲームによる ISP 間の調整金と安定性分析

伊藤 柁基[†] 上山 憲昭^{††}

[†] 立命館大学 情報理工学研究科
〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

^{††} 立命館大学 情報工学部
〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

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 and Stability Analysis among ISPs Using Cooperative Game for ICN Promotion

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

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
2-150, Iwakura, Ibaraki, Osaka, 567-8570

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
2-150, Iwakura, Ibaraki, Osaka, 567-8570

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]、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、協力ゲームの合理的な配分法として知られるナッシュ交渉解やシャープレイ値を用いて調整金を導出した [9]。しかし、そもそも協力が成り立つ安定的な配分であるかは未検討である。そこで本稿では、各提携の不満の最大値を最小化し、ただ一つの配分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。また、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。

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

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。

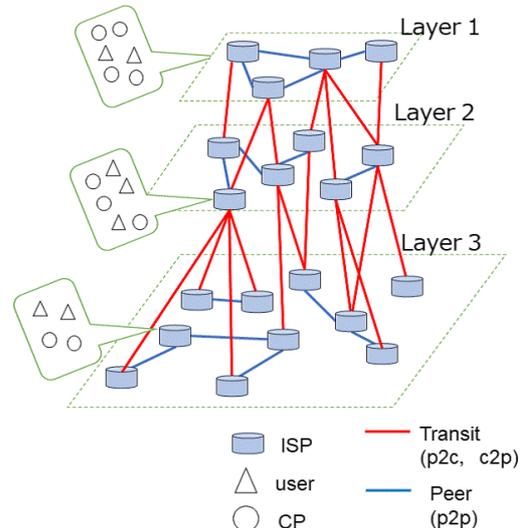


図 1 AS topology model

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].

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

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

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,

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

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

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. [9] から, L_k AS でキャッシュされる確率 p_k は, $k < K$ のとき,

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \prod_{n=k}^K \left\{ 1 - P_{n+1} Q(\sigma_{n+1}) \right\} \quad (7)$$

$k = K$ のとき

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \quad (8)$$

となり, $H_{r,n}$ の確率分布は, L_k AS でキャッシュされているかに応じて以下のように得られる.

$$H_{r,n+r+s-(2t-1)} = h_{r,n}^{pp} G_{r,s,t} W_s \prod_{k=1}^{\max(r,s)} (1-p_k) \quad (9)$$

$$H_{r,r-k} = p_k \frac{1}{g_k^{pp} + 1} \quad (10)$$

$$H_{r,r-k+1} = p_k \frac{g_k^{pp}}{g_k^{pp} + 1} \quad (11)$$

ただし, ユーザのレイヤ r , CP のレイヤ s , 最上位経由レイヤ t とする.

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,

$$E_k = 1 + s \{h(k) - h'(k)\} \quad (12)$$

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.

$$A_k = E_k C U_1 W_k / N_k \quad (13)$$

3.3 各 AS の収益

3.1 節と 3.2 節から, L_k AS の R_k 収益 (USD) は

$$R_k = T + A = T_k^{pc} - T_k^{cp} + A_k \quad (14)$$

で得られる.

3.4 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といえる. 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). 特性関数は, 協力した者の収益の総計の変化量 (以後, 総変化量と呼ぶ) で, 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 導入前と後の L_i AS の収益変化量である. 以上から本研究では, 総変化量の分配の方法を検討する形となる.

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, 合理的な配分法として, 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. 求まる解を各 L_k AS への総変化量の分配 x_k とする. x_k は, $x_1 \times x_2 \times x_3$ 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,

$$x_k = \frac{v(1, 2, 3)}{3} \quad (15)$$

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. 各提携への参加は異なる確率であるとし, 部分提携を S とすると,

$$x_k = \frac{1}{6} \sum_{S \subseteq \{i, j\}} w(S) (v(S \cup \{k\}) - v(S)), \quad (16)$$

$$w(S) = \begin{cases} 2 & (S = \{i, j\}) \\ 1 & (S = \{i\} \text{ or } S = \{j\}) \\ 2 & (S = \emptyset) \end{cases}$$

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. また特に断らない限り, [9] より $\Delta R_1 < 0$ であるが, ユーザの配信遅延に対する感応度 s を $s = 9$ 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, 三者間ナッシュ交渉解による調整金設定を行ったときの, 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 の AS (L_k AS) の総変化量の分配 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 $x_1 \geq 0$ 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.

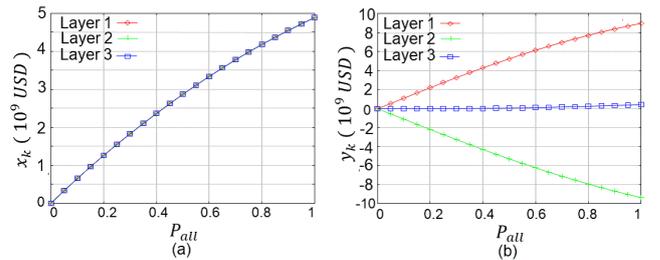


図 2 (a) Revenue distribution to each AS and (b) adjustment received by each AS using Nash bargaining solution

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

5.3 シャープレイ値による調整金設定

図3に、シャープレイ値による調整金設定を行ったときの、(a) x_k と(b) y_k を P_{all} に対し同様にプロットする。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。今回の特性関数では、提携参加者の収益変化量の総計を参照しているため、ICN導入で収益の減少するL₁ASが参加したときの貢献度は低いことになり、分配が少ない。それでも、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L₁AS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、L₁ASにはICNを必ずしも導入するとはいえない。レイヤ図3(b)から、L₁ASがL₂ASとL₃ASから調整金を受け取ることが確認できる。また、L₁ASの受け取る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。そのためL₁ASの貢献度の増加量が減少しているといえるが、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。

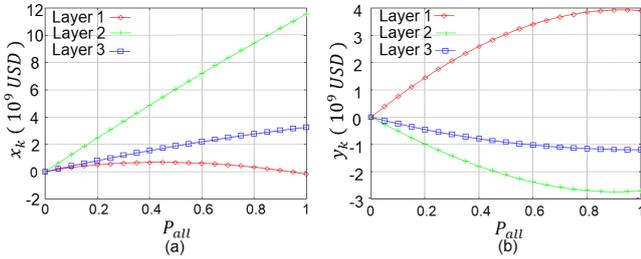


図3 (a)Revenue distribution to each AS and (b)adjustment received by each AS using Shapley value

5.4 各提携の不满

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。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满を

$$e(N, x) = v(N) - \sum_{k \in N} x_k \quad (17)$$

として、前述の2解それぞれの分配に対する各提携の不满を導出する。不满 $e(v, x)$ 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满 $e(v, x)$ と、(b)シャープレイ値で求めた分配に対しての不满 $e(v, x)$ を各々プロットする。図4(a)から、調整金を受け取るL₁ASが関わる提携の不满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L₂ASが関わる提携の不满が正の値で大きく、分配に対して不满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满が負の値であり、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。

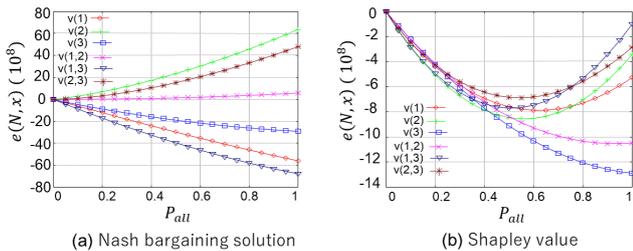


図4 Dissatisfaction with revenue adjustment by (a) Nash bargaining solution and (b) Shapley value

5.4.1 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满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

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

$$\text{個人合理性: } x_k \geq v(k)$$

$$\text{部分提携時の条件: } x_j + x_k \geq v(j, k)$$

のすべてを満たす x が存在するときである。これまでユーザの配信遅延に対する感応度を $s=9$ に設定し、ICN導入でユーザからのアクセス費が増加しやすい想定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满 $e(v, x)$ をそれぞれプロットする。 s が小さくなるにつれ余剰が小さくなり、各提携の不满が大きくなる。さらには不满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。

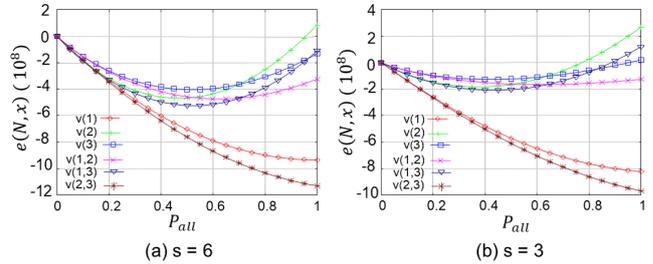


図5 Dissatisfaction with revenue adjustment by Shapley value when (a) $s=6$ and (b) $s=3$

5.4.2 仁

ある分配はコアに含まれない、または、コアが存在しない場合があり、提携合理的で安定した分配にならないことが考えられる。そのため、各提携の不满の最大値を最小化し、ただ一つの分配案に決まる仁を求め、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。具体的には、個人合理性と全体合理性を満たしながら、以下の各提携に対するすべての不满の中で最大の値を最小にするよう線形計画問題を解けばよい。

$$e(1, x) = v(1) - x_1$$

$$e(2, x) = v(2) - x_2$$

$$e(3, x) = v(3) - x_3$$

$$e(1, 2, x) = v(1, 2) - (x_1 + x_2)$$

$$e(1, 3, x) = v(1, 3) - (x_1 + x_3)$$

$$e(2, 3, x) = v(2, 3) - (x_2 + x_3)$$

図6に P_{all} に対し、(a) $s=6$ 、(b) $s=3$ のときの仁による分配に対しての、各提携の不满 $e(v, x)$ をプロットする。 s が小さいほうが余剰が小さく、各提携の不满が大きくなるが、シャープレイ値による分配時よりも最大の不满を持つ提携の不满が小さくなっている。(a)では、すべての提携において不满が負の値であり、 $s > 6$ で合理的で安定した分配といえる。そのため、ICN導入によって、 $s=6$ 程度の余剰が生まれるとき、3者での協力が成り立つといえる。

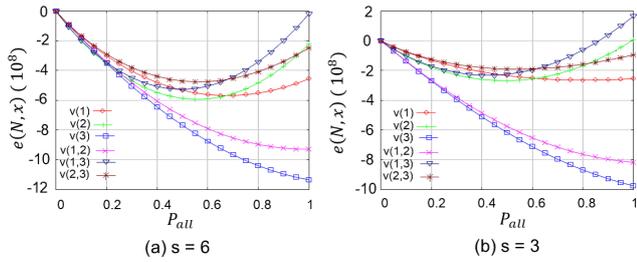


図6 Dissatisfaction with revenue adjustment by Nucleolus when (a) $s = 6$ and (b) $s = 3$

また $s = 6$ のときの分配 (a) x_k , (b) y_k を図7にプロットする。同様に $s = 6$ で、 $P_1 = 0$ のまま、 P_2, P_3 のみを変更させたときの各 L_k AS の収益変化を図8に示す。図7(a), (b) から、シャープレイ値のときと類似した比の分配である。また、同様 L_1 AS が L_2 AS と L_3 AS から調整金を受け取る関係である。協力は安定的であるが、一方で、 $x_1 < 0$ である。そのため、 L_1 AS は ICN を必ずしも ICN を導入するとはいえないが、図8との比較から、 L_1 AS は、 L_2, L_3 AS の ICN 導入を静観する場合や、単独での行動よりも、協力することで損失が軽減され、 L_2 AS, L_3 AS は多くの利益が得られることから、ICN 普及促進のための一つの合意案となるといえる。

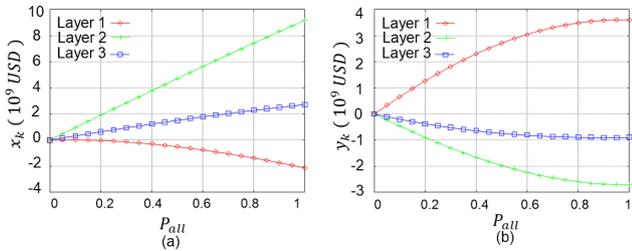


図7 (a) Revenue distribution to each AS and (b) adjustment received by each AS using Nucleolus when $s = 6$

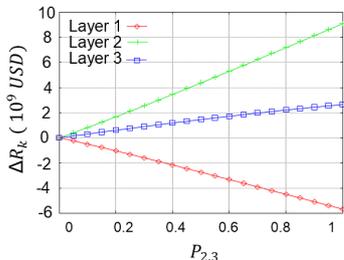


図8 Change of revenue of AS in each layer at $s = 6$ when layer2 and layer3 ASes introduce ICN

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、仁を利用し、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 の提携が安定的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。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、プレイヤーが対等な関係である場合の合意案として適しており、関係が対等でない場合や、協力が部分的な場合には適さないといえる。

次に、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必ずしも成立しない。ユーザ感応度が十分大きいとき、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が、他方で小さいとき、不満をもつ部分提携が存在する。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、より公平な分配であり、特定の貢献度が測定可能な場合に適しているが、一意に解が求められるのみで必ずしも適切な合意案でないことに注意が必要である。

また、適切な合意案かを判別するものとしてコアがある。安定的な分配の集合がコアであるが、感応度が小さい場合には、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。最後に、仁による分配を行うとき、 L_1 AS の収益変化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。ユーザ感応度が十分大きいとき、分配に対して不満をもつ部分提携は存在せず、協力は安定的かつ、安定性が増す。仁は、各部分提携の不満を辞書式順序で最小化する分配で、できるだけ安定性を重視する場合に適しているが、規模によっては計算コストが高くなるため、不満を最小化する必要がない場合には適さないといえる。

不満が無く、分配がコアに含まれるとき協力は安定的であるが、その分配の結果、 L_1 AS の収益変化は一部で負の値になる場合もある。これは協力により、 L_1 AS は単独行動の場合に比べて損失が軽減され、 L_2 AS および L_3 AS はより多くの利益を得られるため、この分配案は ICN 普及促進に向けた合意形成の一例といえる。一方で、ICN 導入による L_1 AS の損失は完全には無くならないため、 L_1 AS がとりうるその他の戦略について検討する必要がある。

以上から今後は、レイヤごとに普及の仕方を変更し、数値評価を行う。また、ICN 導入は、他の AS の収益に影響を与え合うことから、ある提携が他人の利得へも影響を及ぼす。そのため、非協力ゲームとして見立てて、どのような戦略を取りうるかを検討していく予定である。加えて、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, 23K21665, 23K28078 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] Masaki Ito and Noriaki Kamiyama, "Money Adjustment Among ISPs Based on Cooperative Games for ICN Promotion," IEEE CyberSciTech 2024, Malay, Philippines, Nov. 2024