

2024年度

修 士 論 文

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

指導教員: 上山 憲昭

立命館大学大学院 情報理工学研究科
情報理工学専攻 博士課程前期課程
計算機科学コース

学生証番号: 6611230008-3

氏名: 伊藤 枉基

概要

インターネットでは、動画配信サービスの普及や大容量リッチコンテンツの需要の増加により、トラフィック量の急激な増加が予想されている。この問題に対応するため、効率的なコンテンツ配信方式として、情報指向ネットワーク（ICN: Information-Centric Networking）の導入が検討されている。ICN は、コンテンツ名を主体とした通信を実現することで、配信遅延時間の低減やネットワーク負荷の軽減が期待されている。一方で、ICN 導入はインターネットサービスプロバイダ（ISP）間のトラフィックパターンを変化させ、収益構造に影響を与える可能性がある。そのため、各 ISP の収益への影響を分析し、ICN 普及のための合理的かつ安定的な収益配分方法を設計することが求められている。

本研究では、3 階層の AS（Autonomous System）トポロジを想定し、各 ISP の収益構造を解析的に導出する。特に、ICN 導入によるトランジット費の変化と、配信遅延時間の低減によるユーザからの収益増加を考慮した収益変化を分析した。さらに、ICN 普及を促進するための調整金システムとして、収益が増加する ISP からその一部を徴収し、収益が減少した ISP に付与する方式を提案した。調整金の分配方法には、協力ゲーム理論に基づき、ナッシュ交渉解、シャープレイ値、仁（Nucleolus）の 3 つを採用し、それぞれの分配案の特徴と安定性を評価した。

解析の結果、協力ゲームによる分配を行うことで、全レイヤ AS の収益は増加し、ICN の普及可能性があることを示した。一方で、一定の条件下では、一部の提携が不満を抱くため、協力の安定性には課題があることが分かった。また、一部の ISP において収益が減少する場合があります、ICN 完全普及のためにはさらなる検討が必要である。以上から、本研究は、ICN 導入時の収益配分に関する課題を整理し、ISP 間での安定的な協力を実現するための示唆を提供するものである。

目次

第1章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.2 研究の目的	4
第2章 関連研究	6
第3章 想定条件	7
3.1 コンテンツ	7
3.2 トランジット費	7
3.3 ネットワークコスト	8
3.4 キャッシュコスト	8
3.5 AS 間トポロジ	8
3.6 CP, ユーザの収容パタン	10
3.7 キャッシュ設計	10
3.8 AS ポリシーの仮定	11
第4章 各 AS の収益変化の導出	12
4.1 トランジット費の導出	12
4.2 ユーザアクセス費の導出	13
4.2.1 経由ホップ数	13
4.2.2 上昇期待値	14
4.3 各 AS の収益	15
第5章 協力ゲームを用いた合理的な調整金設定方法	16
5.1 ナッシュ交渉解	16
5.2 シャープレイ値	16
第6章 数値評価	18
6.1 評価条件	18
6.2 各 AS の収益の導出	18
6.2.1 ユーザ感応度が AS の収益変化に与える影響	18
6.2.2 ICN の普及が AS の収益変化に与える影響	19
6.3 分配	20
6.3.1 ナッシュ交渉解による調整金	20
6.3.2 シャープレイによる調整金	20
6.4 不満	22

6.4.1	コア	22
6.4.2	仁	23
第 7 章	まとめ	25
第 8 章	謝辞	26
外部発表文献		29

第1章 序論

1.1 研究の背景

現在のインターネットは、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方式が一般的である。しかし、この方式では通信に際して、コンテンツ名と IP アドレスを変換する名前解決のプロセスが必要となり、オーバーヘッドが発生する。また、近年では、テキストや画像などの小容量のコンテンツに加え、動画や音声などの大容量リッチコンテンツが主流となっている。特に、YouTube や Netflix といった動画配信サービスに代表されるリッチコンテンツは、ユーザからの需要が増加しているだけでなく、ストリーミング品質の向上によってより大容量のデータ転送を必要とするようになっている。この結果、ネットワーク全体でのトラフィック量が急激に増加しているため、より効率的なコンテンツ配信技術の導入が求められている。

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) 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 パケットを送信すると、各ルータは IP アドレスではなくコンテンツ名に基づいてパケットを転送する。要求されたコンテンツがルータ内にキャッシュされている場合には、interest パケットの転送は行われず、直接ルータ内のキャッシュからコンテンツが配信される。この仕組みによって、名前解決のオーバーヘッドを回避し、通信経路を短縮できるため、ユーザにより近い位置から効率的にコンテンツを提供できる。結果として、遅延時間の短縮やネットワーク負荷の軽減が期待されている。

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ネットワーク (AS: Autonomous System) を相互に接続することで構成されている。各 AS は、インターネット全体への接続性を確保するために、トランジット ISP と接続を行い、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。このトランジット費のやり取りは、各 ISP の収益に大きな影響を与える重要な要素である。しかし、ICN の導入は ISP 間のトラフィックパターンを変化させるため、各 ISP の利益構造に影響を与える可能性がある。また、ICN の導入は、各 ISP の経営判断に基づいて行われるため、導入による利益が見込めない場合には採用されないことも考えられる。したがって、ICN の普及可能性を明確にするためには、ICN 導入が各 ISP の収益に与える影響を分析し、普及を促進する方法を検討する必要がある。

1.2 研究の目的

これまでの研究では、階層的な AS 間のトポロジ構造を対象に、ICN 普及時の各階層の AS の収益を分析されている [27][28]。ICN 導入で自身の収益は減少の見込みがあるが、効率化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、ICN 導入時に発生する収益変化に対し、合理的かつ安定した収益配分方法を検討し、ICN 普及に向けたインセンティブ設計を行う。具体的には、ナッシュ交渉解やシャープレイ値といった協力ゲーム理論を用いて調整金を導出し、これら収益配分法を 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。また、配分方法が協力関係における安定性へ与える影響を評価することで、効率的なコンテンツ配信を実現するための ICN 普及促進手法の一例を示すことを目指す。

第2章 関連研究

ICN 研究の調査では、未解決問題の一つとしてビジネスの面での ICN の展開が挙げられている [11]. [23] では ICN アーキテクチャの社会経済分析を試みているが、トラフィックの課金、コスト計算など未解決の問題があることが指摘されている。一方、AS 間の関係をモデル化し、他の ISP と接続契約を結ぶ際の各 ISP の行動を分析した研究も多く存在する。例えば、Lodhi らは、トランジットプロバイダのピアリング戦略を検討し、実行可能なナッシュ均衡戦略を導出している [15]. Dhamdhere らは、各 ISP の利益の観点から、2つの ISP 間のピアリング契約に必要な条件を分析している [4]. さらに、Valancius らは、ユーザが生成するトラフィック需要と ISP がトラフィックを伝送するためのコストをモデル化し、トランジットコストの差別化が ISP の行動に与える影響を分析している [25]. また、コンテンツ配信サービスにおける各種プレイヤー間の関係をモデル化し、均衡状態における各プレイヤーの利益を分析した研究も行われている [14], [16]～[19]. ICN に関する研究は活発であり、その有効性と課題について多くの議論が行なわれている。Rajahalme らは、各 AS が自身のネットワークにコンテンツをキャッシュする動機付けがない可能性があることを示し、インセンティブを支払う必要性を示唆している [21]. Kamiyama らは、階層化された AS トポロジーに基づく ICN 導入の収益への影響を定量的に評価し、やはり一部の AS に対し、インセンティブの必要性を示している [27].

[14]～[19] といった研究では、シュタッケルベルグ競争や提携型ゲームなどのゲーム理論が積極的に用いられている。ゲーム理論は複数の意思決定主体からなる社会的な問題を明確に分析するうえで有用であり [29], ICN 領域においても、キャッシュの価格設定や、メモリ割り当てについて最適化、利益の最大化といったことを目指してゲーム理論を活用している [9][12][13].

以上から、一部の研究ではゲーム理論を用いた収益評価や、インセンティブの必要性を示唆しているが、協力ゲーム的アプローチで複数 ISP の収益配分を検討する例はまだ少ない。特に ICN では、キャッシュによるトラフィックの変化による恩恵や費用負担が ISP 間で非対称的に発生する可能性が高く、また、全体効率的に、複数プレイヤーが協力的に行動するための調整金システムが重要となると考える。

第3章 想定条件

本節では、ICN 導入による各 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。

3.1 コンテンツ

大容量のリッチコンテンツが全 AS のネットワーク上で提供される環境を想定する。コンテンツ総数は M 個とし、各コンテンツのサイズは一律 L (Mbytes) とする。各ユーザの月間平均視聴回数を d 、コンテンツ m が選択される確率を q_m と仮定する。なお、コンテンツ ID は q_m の降順に割り当てられ、 q_1 が最も人気のあるコンテンツ、 q_M が最も人気の低いコンテンツに対応するものとする。また、 Q_m を q_m の累積分布 ($Q_m = \sum_{i=1}^m q_i$) とし、ユーザの総数を U_1 、CP (contents provider) の総数を U_2 と定義する。

3.2 トランジット費

ISP 間のトランジット接続では、契約 ISP に対して月間のトランジットリンク上のデータ転送レートに基づいて課金が行われる。月間トランジット費 T は、データ転送レート V (Mbps) の 0.75 乗に比例するとされ、 $T = 100V^{0.75}$ で近似できる [2]。次に、 V は平均転送レートの 3 倍と仮定する [3]。また、トランジットリンクを通るトラフィックには、provider から customer に向かう方向 (downhill) と、customer から provider に向かう方向 (uphill) があり、 V は以下の 2 種類のモデルで算出される [22]。

max model downhill 方向、uphill 方向のうち、より大きい方のトラフィック量を基準とする。

some model 両方向のトラフィック量の合計を基準とする。

月間にリンクを通過するコンテンツ配信回数を downhill 方向で D_d 、uphill 方向で D_u とすると、データ転送レート 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、

$$D = \begin{cases} \max(D_d, D_u), & \text{max model} \\ D_d + D_u, & \text{sum model} \end{cases} \quad (3.1)$$

で与えられ、月間のトランジット費 T は次式で得られる。

$$T = 100 \{1.08 \times 10^{-5}LD\}^{0.75} \quad (3.2)$$

3.3 ネットワークコスト

各 ISP はネットワークの構築・運用コストを負担する必要があり、自ネットワーク上でコンテンツを 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 [8], 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 [24]。これに基づき、 $\kappa = (1.57 \times 1.8 \times 8L) / (30 \times 24 \times 3600) = 8.72 \times 10^{-6}L$ とする。

3.4 キャッシュコスト

各ルータにキャッシュメモリが必要となり、その導入コストが発生する。キャッシュメモリに DRAM を使用し、3 年ごとに更新すると仮定する。1Mbyte あたりのメモリコストを 0.016 USD とすると [20], キャッシュ容量を B (単位: コンテンツ数) とした場合、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。

3.5 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される。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形で接続される。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、がトランジット接続をする場合、上位レイヤ 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、下位レイヤ AS 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) が L_{k+1} AS に対して p2c リンクを有する場合、 L_{k+1} AS は L_{k+1} AS に対して c2p リンクを有することになる。

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 [6] 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 [7] 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 [27]。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 3.1 になる。

Universities AS と Customers AS はユーザや CP を収容するネットワークとみなせる。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

表 3.1: 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

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 数は以下になる．(表 3.2)

表 3.2: 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 3.3 になる．各 L_k AS ($1 \leq k \leq K-1$) は

表 3.3: 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

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．

3.6 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は, 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 3.1 において, レイヤ k に割り当てられた Universities もしくは Customers AS は L_{k-1} AS に対して c2p リンクを有する. そのため, 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. 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, 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仮定する. この仮定に基づき, コンテンツの配信要求が発生した際に, 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 が同じレイヤ k の AS に収容されている確率 ω_k は $\omega_k = W_k/N_k$ となる. また, 図 3.1 に, 本稿で想定する AS 間トポロジモデルを示す.

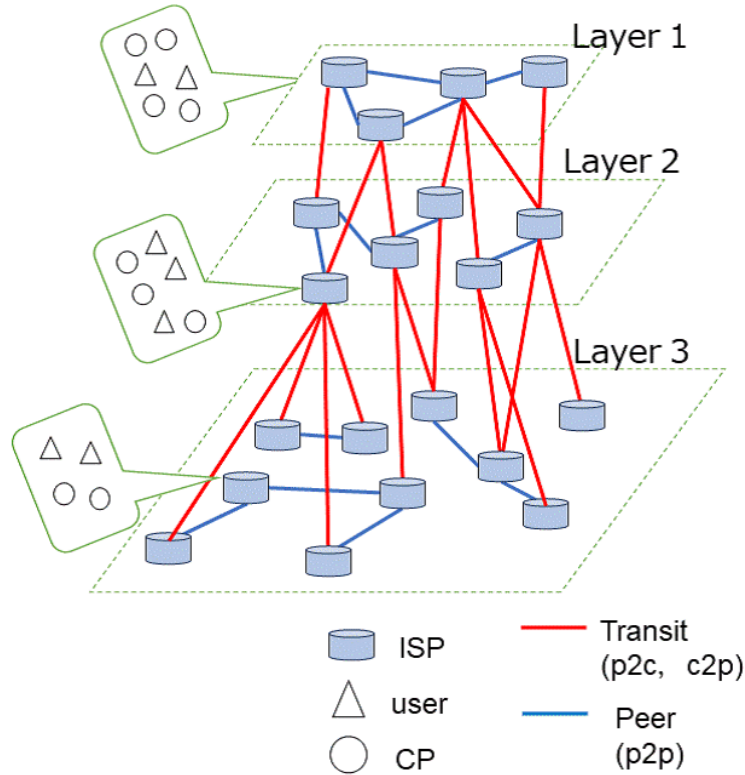


図 3.1: AS topology model

3.7 キャッシュ設計

ICN 導入に伴い, 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 では, 自ネットワーク内の全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. なお、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.

3.8 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 [21]. 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、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 [6]) 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 間で完全な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 (トランジット費を受け取る)、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 [10]. さらに、ICN を用いている AS は、自ネットワーク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. 特に、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、将来的に自身の 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る. これにより、c2p リンクを downhill 方向に流れるトラフィック量を削減することができるため、provider AS から受信したコンテンツは自ネットワーク内でキャッシュする [5][21]. 一方で、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 [5][21]. 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フィ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 [5].

第4章 各 AS の収益変化の導出

4.1 トランジット費の導出

3 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_kAS が ICN を導入している確率を P_k とすると、各 L_kAS 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 $F_{d,k}$ 、peerAS もしくは、自身の収容 CP から配信フローが通る確率 $F_{p,k}$ 、そして、各 L_kAS のネットワークに配信フローが流入する確率 F_k^{all} はそれぞれ以下ようになる [27][28].

$$F_{u,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=k}^K \sum_{t=1}^{k-1} G_{r,s,t} \frac{W_r W_s}{N_k g_k^{cp}} \left[\prod_{n=t}^r (1 - P_n) + \sum_{m=t}^r \prod_{n=t}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (4.1)$$

$$F_{d,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=1}^K \phi_{r,s,k} W_r W_s \left[\prod_{n=k}^r (1 - P_n) + \sum_{m=k}^r \prod_{n=k}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (4.2)$$

$$F_{p,k} = \sum_{r=1}^K \sum_{s=1}^K \mu_{r,s,k} W_r W_s \left[\prod_{n=k+1}^r (1 - P_n) + \sum_{m=k+1}^r \prod_{n=k+1}^{m-1} (1 - P_n) P_m \{1 - Q_{(\sigma_m)}\} \right] \quad (4.3)$$

$$F_k^{all} = g_k^{pc} F_{u,k+1} + g_k^{cp} F_{d,k} + (g_k^{pp} + 1) F_{p,k} \quad (4.4)$$

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 となる確率である。 $2 \leq t \leq \min(r, s)$ の各 t に対しては、

$$G_{r,s,t} = \prod_{i=t+1}^{\min(r,s)} \left(1 - \frac{g_i^{pp} + 1}{N_i} \right) \frac{g_t^{pp} + 1}{N_t} \quad (4.5)$$

となり、 $t = 1$ のとき

$$G_{r,s,1} = \prod_{i=1}^{\min(r,s)} \left(1 - \frac{g_i^{pp} + 1}{N_i} \right) \quad (4.6)$$

となり、 $\min(r, s) < t \leq K$ の各 t に対しては $G_{r,s,t} = 0$ となる。 $\phi_{r,s,k}$ は、ユーザがレイヤ r 、CP がレイヤ s のときの、各 L_kAS の c2p リンクを配信フローが通る確率である。 $k \leq s$ のとき、

$$\phi_{r,s,k} = \sum_{t=1}^{k-1} \frac{G_{r,s,t}}{N_k g_k^{cp}} \quad (4.7)$$

となり、 $k > s$ のとき $\phi_{r,s,k} = 0$ となる。同様に、 $\mu_{r,s,k}$ は、各 p2p リンクおよび自身の収容 CP から配信フローが流入する確率であり、

$$\mu_{r,s,k} = \frac{G_{r,s,k}}{N_k (g_k^{pp} + 1)} \quad (4.8)$$

となる。また、L_kAS のキャッシュの上限は σ_k で、3.7、3.8 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_kAS 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。

$$\sigma_k = \frac{B_k}{\frac{1}{g_k^{pp} P_k + 1} - \frac{W_k}{N_k}} \quad (4.9)$$

前節と (3.2) から、 T_k^{pc} を L_k AS が customer である L_{k+1} AS から受け取るトランジット費、 T_k^{cp} を L_k AS が provider である L_{k-1} AS にしはらうトランジット費とすると、

$$T_k^{pc} = 100 \{ \kappa L d U_1 (F_{u,k+1} + F_{d,k+1}) \}^{0.75} g_k^{pc} \quad (4.10)$$

$$T_k^{cp} = 100 \{ \kappa L d U_1 (F_{u,k} + F_{d,k}) \}^{0.75} g_k^{cp} \quad (4.11)$$

となる。

4.2 ユーザアクセス費の導出

各 ISP は、自身の収容ユーザから月間にアクセス費 $A_{r,k}$ を得ている。 $A_{r,k}$ は各 L_k AS が自身の収容ユーザから月間に得るアクセス費で、各ユーザから定額 α (USD) の料金を月間に徴収することを想定すると $A_{r,k} = \alpha \omega U_1$ となる。

4.2.1 経路ホップ数

ここで、配信遅延時間低減により、ユーザの満足度が向上し、アクセス費の増加が見込めると仮定する。配信遅延時間を経路ホップ数として考え、 L_r AS に収容されている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 ホップとして扱う。

3.8 で述べたように、provider AS は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 AS¹、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の AS は、収益の観点から利点がないため、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 $1/N_t$ で与えられる。また、 $t = 2, 3$ のとき、 $h_{t,1}^{pp} = 1 - 1/N_t$ となる。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。例えば、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、

$$1 - \frac{\prod_{i=0}^{b-1} (a - c - i)}{\prod_{i=0}^{b-1} (a - i)} \quad (4.12)$$

となる。ここで $h_n^{pp}(n > 0)$ について考えると、

¹ この場合、p2p リンクを用いないで自身の customer へ折り返す。

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.

$$h_{1,n}^{pp} = 1 - \frac{\prod_{i=0}^{h_{1,n-1}^{pp} N_1 - 1} (N_1 - h_{1,n-1}^{pp} N_1 - g_1^{pp} - i)}{\prod_{i=0}^{h_{1,n-1}^{pp} N_1 - 1} (N_1 - h_{1,n-1}^{pp} N_1 - i)} \quad (4.13)$$

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,

$$r + s - (2t - 1) \quad (4.14)$$

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,

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \prod_{n=k}^K (1 - P_{n+1} Q(\sigma_{n+1})) \quad (4.15)$$

で得られ, $k = K$ のときは次式で得られる.

$$p_k = P_k Q(\sigma_k) \quad (4.16)$$

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.

$$H_{r,n+r+s-(2t-1)} = h_{r,n}^{pp} G_{r,s,t} W_s \prod_{k=1}^{\max(r,s)} (1 - p_k) \quad (4.17)$$

$$H_{r,r-k} = p_k \frac{1}{g_k^{pp} + 1} \quad (4.18)$$

$$H_{r,r-k+1} = p_k \frac{g_k^{pp}}{g_k^{pp} + 1} \quad (4.19)$$

4.2.2 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,

$$E_k = 1 + s(h(k) - h'(k)) \quad (4.20)$$

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 $A_{r,k}$ は次式で表される.

$$A_{r,k} = E_k \alpha \omega_k U_1 \quad (4.21)$$

4.3 各 AS の収益

各 L_k AS の収益 R_k (USD) は,

$$R_k = T_k^{pc} - T_k^{cp} + A_{r,k} + A_{c,k} - C_{n,k} - C_{m,k} \quad (4.22)$$

で得られる。ただし, $A_{c,k}$ は各 L_k AS が自身の収容 PC から得られる月間のアクセス費である。ISP 間のトランジット費と同様の従量課金を想定し, $A_{c,k} = 100\{1.08^{-5}LdU_1/U_2\}^{0.75}U_2\omega_k$ となる [27]。また, $C_{n,k}$ は各 L_k AS が負担する月間のネットワークコストであり, 3.3 節で定義した κ を用いて, $C_{n,k} = \kappa dU_1 F_k^{all}$ と表せられる。 $C_{m,k}$ は各 L_k AS が月間に負担するキャッシュメモリのコストであり, 3.4 節で定義した通り, $C_{m,k} = 4.44^{-4}LB_k$ となる。

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。今回, P_k により変化するのは, T_k^{pc} , T_k^{cp} , A_k , $C_{n,k}$ で, ICN 導入前後のこれらの数値を比較することで, 各 AS の収益変化量を導出する。

第5章 協力ゲームを用いた合理的な調整金設定方法

トランジット費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、ユーザアクセス費は市場への新たな資金の流入である。また、キャッシュによりネットワーク全体のトラフィック量は減少することから、ネットワークコストも全体では減少であると考えられる。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。本節では節で導出した各 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。

5.1 ナッシュ交渉解

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、

$$x_k = \frac{v(1, 2, 3)}{3} \quad (5.1)$$

で求められる。

5.2 シャープレイ値

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な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

²1 と 2 の提携時、ICN 導入レイヤは 1 と 2 である

は一様な確率であるとし，部分提携を S とすると，

$$x_k = \frac{1}{6} \sum_{S \subseteq \{i,j\}} w(S) (v(S \cup \{k\}) - v(S)), \quad (5.2)$$

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

と求められる．

第6章 数値評価

6.1 評価条件

ISP が各ユーザから徴収するもとのアクセス費を $\alpha = 50$ 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 ($q_m = (m\sigma_{j=1}^M 1/j)^{-1}$). 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, $B_{min} = 10$, $\epsilon = 5$ に設定する [27]. また, トランジット費は sum model の場合で算出する.

6.2 各 AS の収益の導出

6.2.1 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 を導入したときの全 L_k AS の総収益変化量 ΔR_k を導出した. 具体的には, L_1 AS のみの ICN 普及率 P_1 を 0 から 1 へ変化させた際の, 各レイヤの AS の収益変化量を評価した. 図 6.1 に, 感応度 s を変化させたときの 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, トランジット費減少に伴い, 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ユーザアクセス費の増加効果が大きく, ICN 導入によって 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 普及を促進するためには, 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. 以上を踏まえ, 以降は $\Delta R_1 < 0$ となる場合について検討していく.

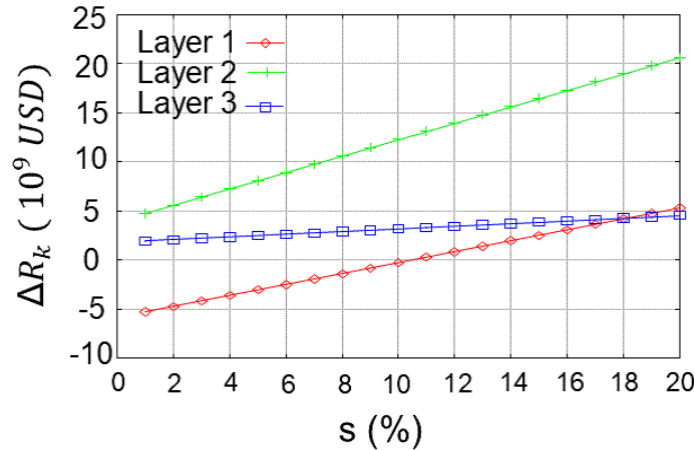


図 6.1: Change of revenue of each AS in each layer against S , sensitivity of users for delay, when only L_1 ASes introduce ICN

6.2.2 ICN の普及が AS の収益変化に与える影響

図 6.2 に、全レイヤの AS の ICN 普及率を 0~1 に変化させたときの、各 L_k AS 全体の (a) トランジット費の変化量 ΔT_k , (b) アクセス費の変化量 $\Delta A_{r,k}$, (c) ネットワークコストの変化量 $\Delta C_{n,k}$, および (d) それらの総収益変化量 ΔR_k をそれぞれプロットする。ただし、以後断りがない限り、 $\Delta R_1 < 0$ で、ユーザからの収益の変化が大きい $s = 9$ に設定して評価を行う。トランジット費については、キャッシュによる交流トラフィックの変化により、従来通り L_1 AS は負の値、 $L_{2,3}$ AS は正の値になることが確認できる。同様にアクセス費は、キャッシュによる配信遅延時間低減によるユーザの満足度向上により、全てのレイヤで増加しており、各 L_k AS 間の協力の一助となる期待ができる。また、支払うネットワークコストも全てのレイヤで減少する。 L_1 AS のコスト減少が顕著なのは、やはりキャッシュによる影響で、上位レイヤへのトラフィックの流入量減少のためである。一方で、他の費用の変化よりも小さく、収益全体に与える影響は限定的である。

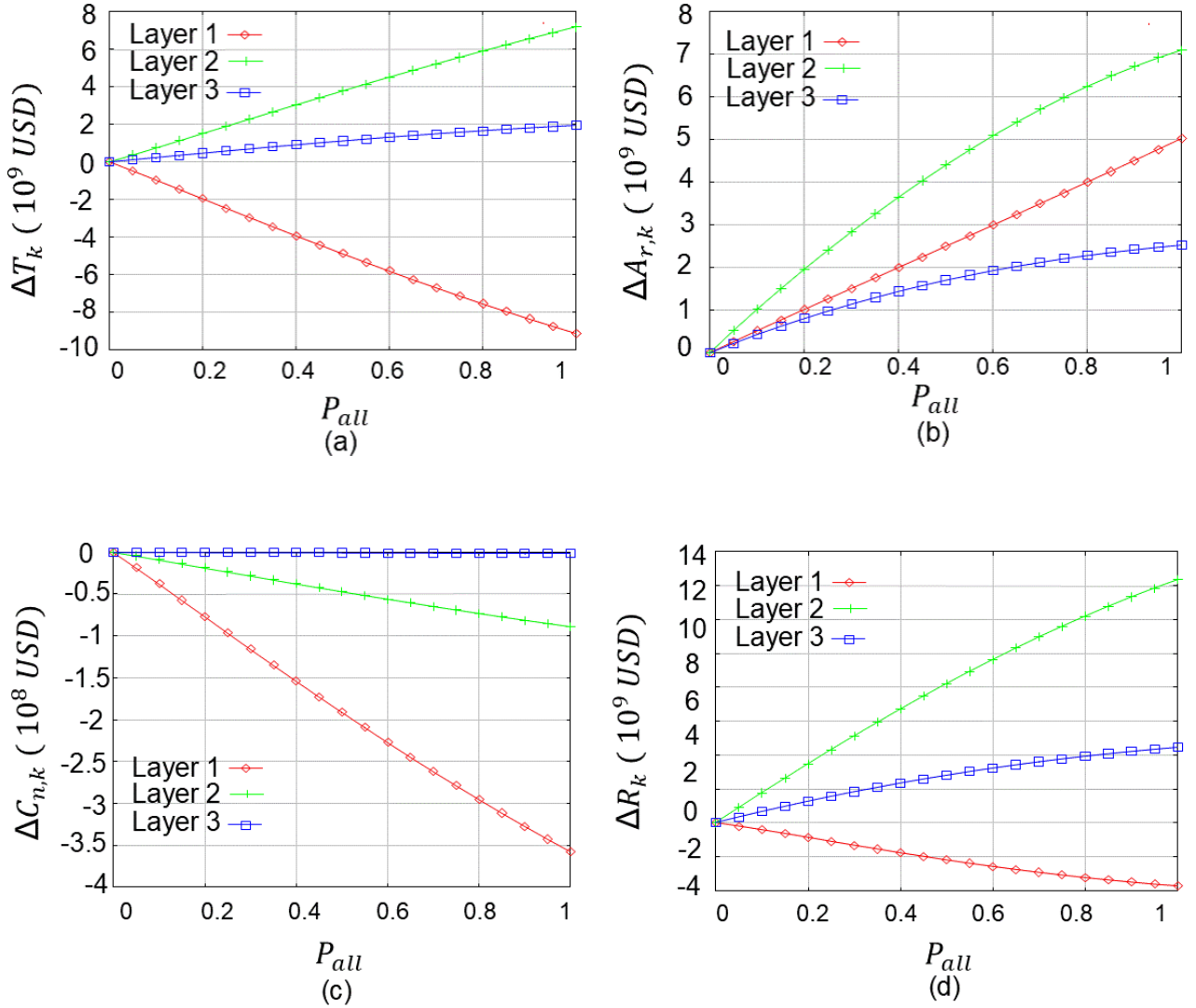


図 6.2: Change of (a) transit fee, (b) access fee, (c) network cost and (d) revenue of AS in each layer when all ASes introduce ICN

6.3 分配

5章で述べた特性関数形ゲームで見立てて、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。

6.3.1 ナッシュ交渉解による調整金

図6.3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6.3(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間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 $v(1,2,3)$ は大きくなり、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を導出するといえる。図6.3(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。

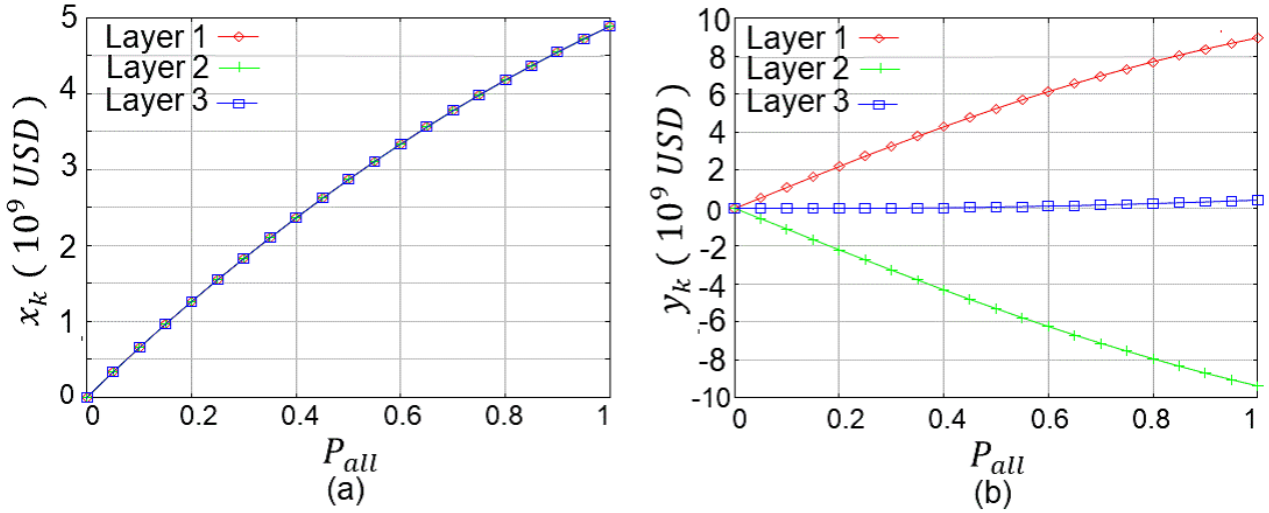


図 6.3: (a)Revenue distribution to each AS and (b)adjustment received by each AS using Nash bargaining solution

6.3.2 シャープレイによる調整金

図6.4に、同様に P_{all} に対し(a) x_k と(b) y_k をプロットする。図6.4(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、調整金無しの場合に見られる L_1 ASの収益の減少を抑えられている。また、すべての場合で $x_1 \geq 0$ であり、シャープレイ値による分配を行うとき、 L_1 ASはICNを導出するといえる。図6.4(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。ただし、 L_1 AS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 L_1 AS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6.5に L_2, L_3 ASのICNの普及率が0(a) $P_2 = P_3 = 0$ の際と、普及率1(b) $P_2 = P_3 = 1$

の際に、 P_1 を変動させた場合の L_2 , L_3 AS の収益の変化を示す。2 図から分かるように、すでに下位レイヤで ICN が導入されている際の、新たな上位レイヤの ICN 導入の及ぼす効果が小さいことが確認できる。

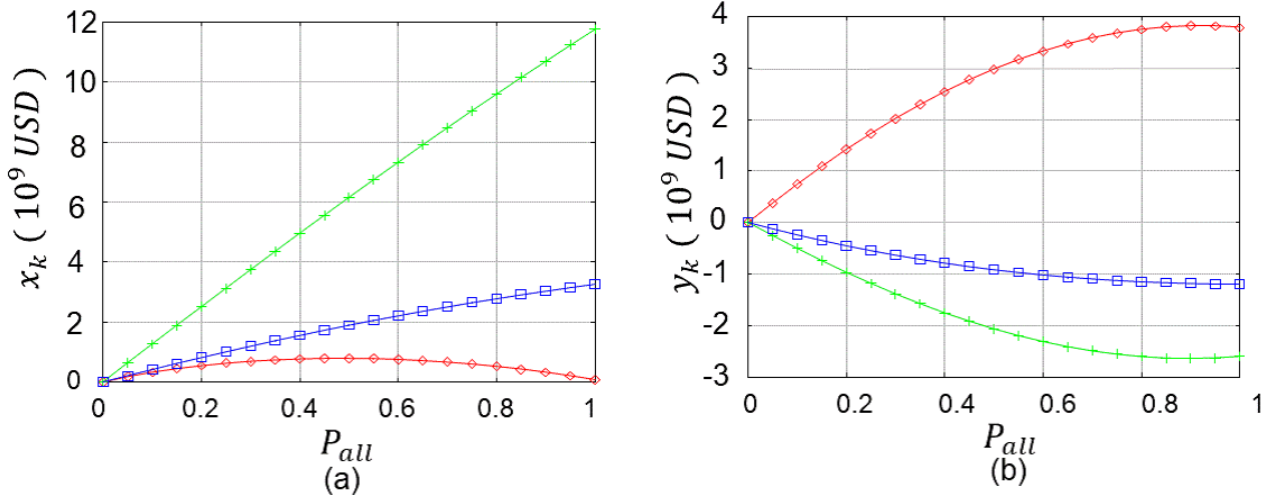


図 6.4: (a)Revenue distribution to each AS and (b)adjustment received by each AS using Shapley value

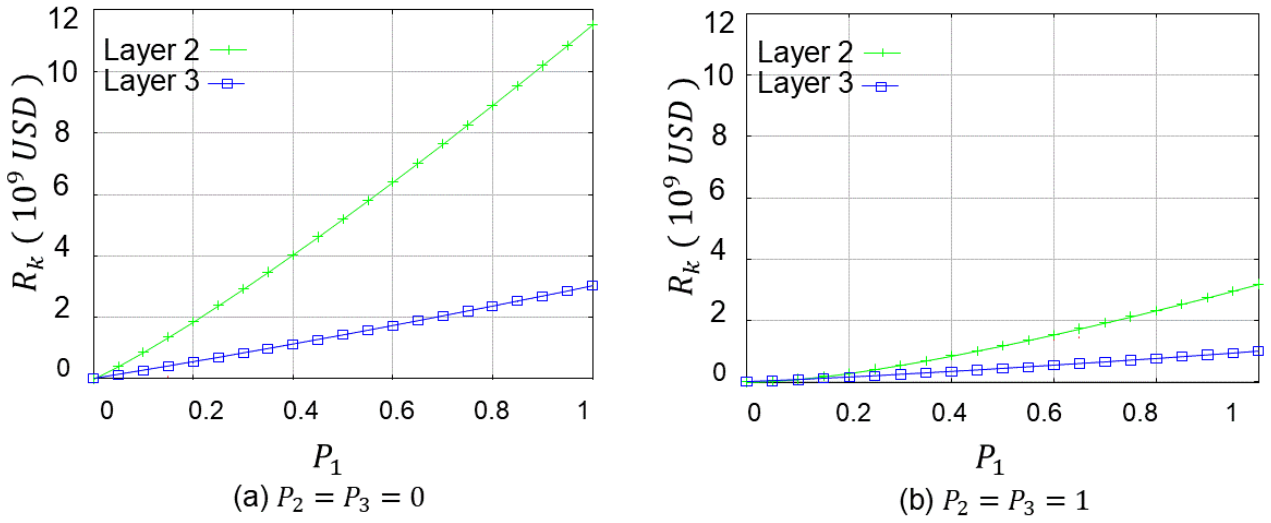


図 6.5: Change of revenue in layer 2 and 3 when layer 1 ASes introduce ICN

6.4 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．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

$$e(N, x) = v(N) - \sum_{k \in N} x_k \quad (6.1)$$

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 6.6 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 6.6(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、その値も小さいため、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 6.6(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．

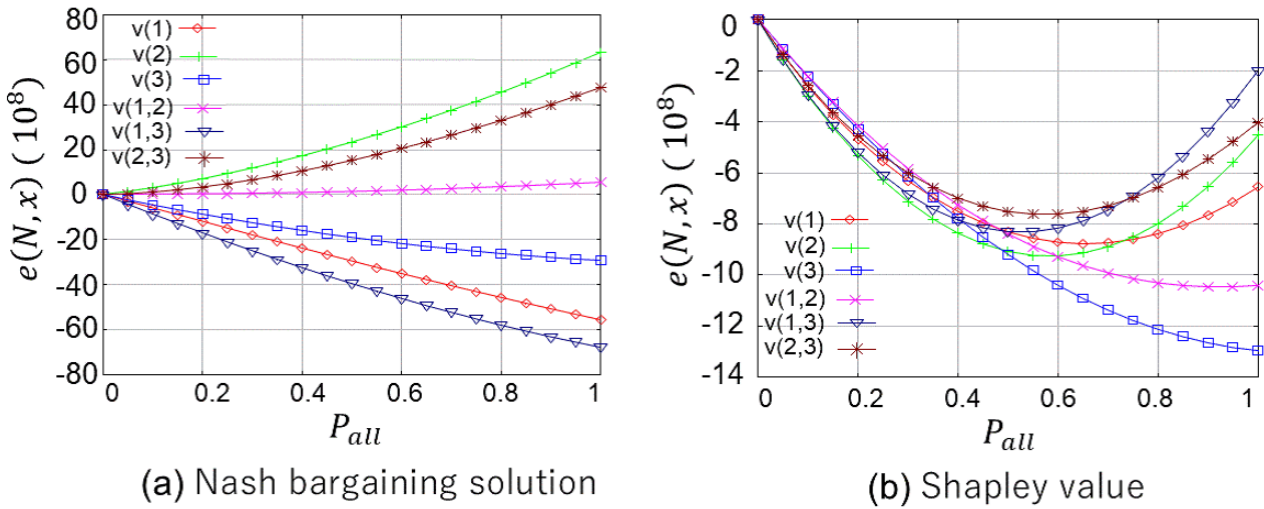


図 6.6: Dissatisfaction with revenue adjustment by (a) Nash bargaining solution and (b) Shapley value

6.4.1 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、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 6.7 に (a) $s = 5$, (b) $s = 1$ 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。

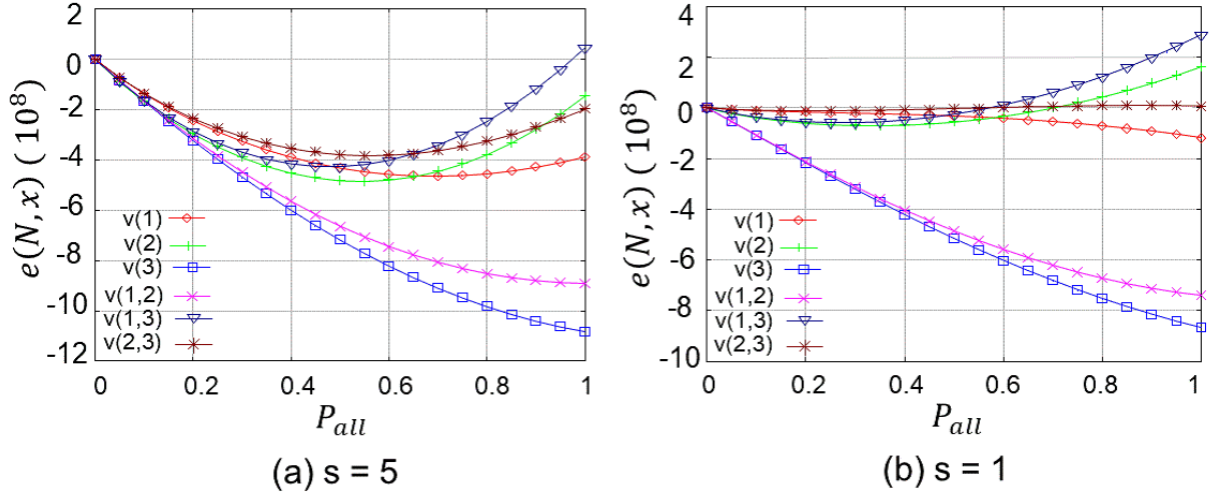


図 6.7: Dissatisfaction with revenue adjustment by Shapley value when (a) $s = 6$ and (b) $s = 3$

6.4.2 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、各提携の不満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満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。

$$\begin{aligned}
 e(1, x) &= v(1) - x_1 \\
 e(2, x) &= v(2) - x_2 \\
 e(3, x) &= v(3) - x_3 \\
 e(1, 2, x) &= v(1, 2) - (x_1 + x_2) \\
 e(1, 3, x) &= v(1, 3) - (x_1 + x_3) \\
 e(2, 3, x) &= v(2, 3) - (x_2 + x_3)
 \end{aligned}$$

図 6.8 に P_{all} に対し、(a) $s=5$, (b) $s=1$ のときの仁による分配に対しての、各提携の不満 $e(v, x)$ をプロットする。 s が小さいほうが余剰が小さく、各提携の不満が大きくなるが、シャープレイ値による分配時よりも最大の不満持つ提携の不満が小さくなっている。(a) では、すべての提携において不満が負の値であり、 $s > 5$ 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、 $s = 5$ 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。

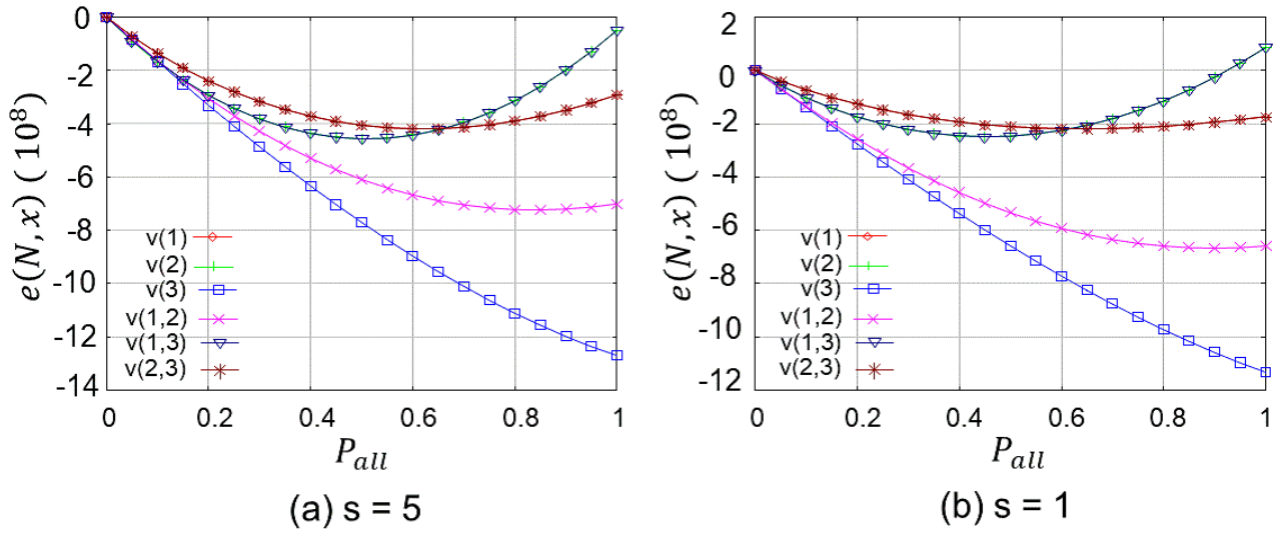


図 6.8: Dissatisfaction with revenue adjustment by Nucleolus when (a) $s = 5$ and (b) $s = 1$

また $s = 5$ のときの分配 (a) 各レイヤ $k(L_k)$ の AS の総変化量の分配 x_k , (b) 調整金として受け取る金額 y_k をプロットする. 図 6.9(a), (b) から, 分配の比率はシャープレイ値の結果と類似しており, 同様に 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, 協力によって, L_1 AS は単独での行動よりも損失が軽減され, L_2 , 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.

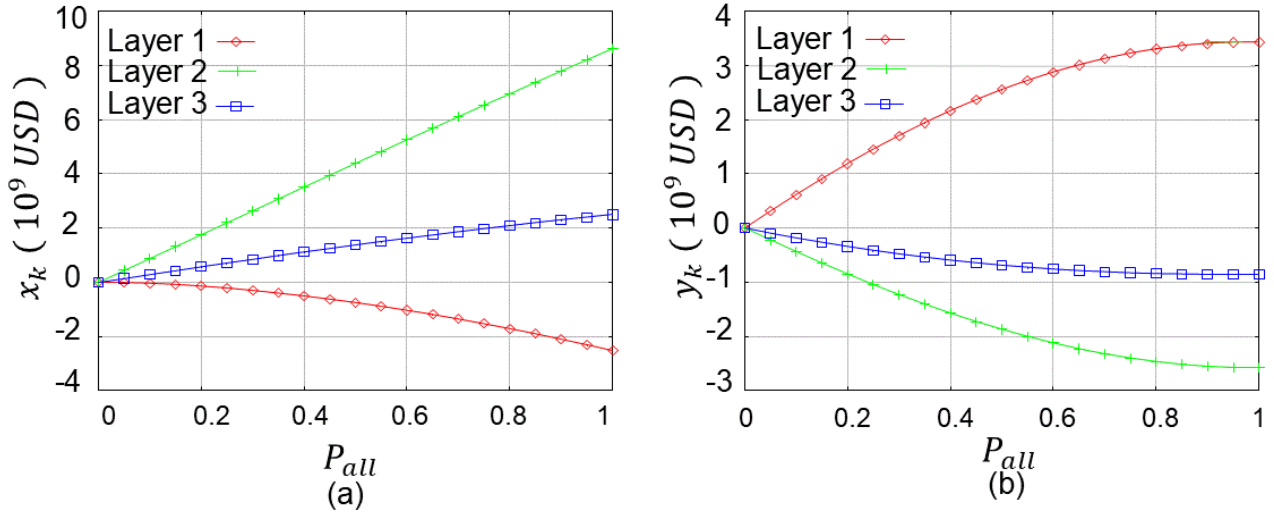


図 6.9: (a) Revenue distribution to each AS and (b) adjustment received by each AS using Nucleolus when $s = 5$

第7章 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場合、 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場合、ユーザ感応度が十分大きいとき、 L_1 AS の収益は増加するため、ICN の普及可能性がある。また、この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、一方でユーザ感応度が小さいとき、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場合、 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、協力は安定的でかつ、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 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。

以上から今後の課題としては、レイヤごとに普及の仕方を変更しての数値評価が挙げられる、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することが可能である、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する必要があると考えられる。

第8章 謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導をいただいた上山教授に感謝します．また日常，有益な議論をしていただいた研究室の皆様に感謝します．

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] A. Dhamdhere, C. Dovrolis, and P. Francois, "A Value-Based Framework for Internet Peering Agreements," Proc. 22nd ITC, pp. 1-8, 2010.
- [5] S. DiBenedetto, C. Papadopoulos, and D. Massey, "Routing Policies in Named Data Networking," ACM ICN 2011.
- [6] X. Dimitropoulos, et al., "AS Relationships: Inference and Validation," ACM CCR, Vol.37, no.1, pp.29-40, 2007.
- [7] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, G. Riley, and K. Claffy, "Revealing the Autonomous System Taxonomy: The Machine Learning Approach," PAM 2006.
- [8] DePeering International, <http://depeering.net>
- [9] F. Khandaker, et al., "Reverse Auction-Based Dynamic Caching and Pricing Scheme in Producer-Driven ICN," Proc. IEEE ICC, 2023.
- [10] L. Gao, "On Inferring Autonomous System Relationships in the Internet," IEEE/ACM ToN, vol.9, no.6, pp.733-745, Dec. 2001.
- [11] George Xylomenos et al., "A Survey of Information-Centric Networking Research" IEEE Communications Surveys & Tutorials, VOL. 16, NO. 2, SECOND QUARTER 2014
- [12] M. Hajimirsadeghi, N. B. Mandayam, and A. Reznik, "Joint Caching and Pricing Strategies for Popular Content in Information-Centric Networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 3, pp. 557-569, Mar. 2017.
- [13] Q. Zheng, et al., "An ICN Cache Pricing Mechanism Based on Non-cooperative Game Model of Users and Advertisers," Proc. 3rd Int. Conf. Hot Info-Centric Networking, 2020.
- [14] D. Lee, J. Mo, and J. Park, "ISP vs. ISP+CDN: Can ISPs in Duopoly Profit by Introducing CDN Services?" W-PIN 2012.
- [15] A. Lodhi, A. Dhamdhere, and C. Dovrolis, "Peering Strategy Adoption by Transit Providers in the Internet: A Game Theoretic Approach," ACM SIGMETRICS Perform. Eval. Rev., vol. 40, no. 2, pp. 38-41, Sep. 2012.
- [16] R. Ma, et al., "Internet Economics: The use of Shapley value for ISP settlement," ACM CoNEXT 2007.
- [17] R. Ma, et al., "Interconnecting Eyeballs to Content: A Shapley Value Perspective on ISP Peering and Settlement," ACM NetEcon 2008.
- [18] R. Ma, et al., "On Cooperative Settlement Between Content, Transit and Eyeball Internet Service Providers," ACM CoNEXT 2008.
- [19] J. Musacchio, et al., "Network Neutrality and Provider Investment Incentives," Asilomar Conference 2007
- [20] D. Perino and M. Varvello, "A Reality Check for Content Centric Networking," ACM ICN 2011.
- [21] J. Rajahalme, et al., "Incentive-Compatible Caching and Peering in Data-Oriented Networks," ACM ReArch 2008.
- [22] R. Stanojevic, I. Castro, and S. Gorinsky, "CIPT: Using Tuangou to Reduce IP Transit Costs," ACM CoNEXT 2011.
- [23] J. Tateson, T. Burbridge, D. Trossen and M. Ain, "PSIRP deliverable 4.6: Final evaluation report on deployment incentives and business models, [online] Available: <http://www.psirp.org/publications.html>.
- [24] H. Yu, et al., "Understanding User Behavior in Large-Scale Video-on-Demand Systems," EuroSys 2006.

- [25] V. Valancius, et al., “How Many Tiers? Pricing in the Internet Transit Market,” ACM SIGCOMM, 2011.
- [26] N. Kamiyama, “Effect of Content Charge by ISPs in Competitive Environment,” IEEE/IFIP NOMS 2014.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] M. Suzuki, “新ゲーム理論,” 勁草書房, 1995.

外部発表文献

- [1] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, ICN 導入が他 ISP の利益に与える影響の分析, 電子情報通信学会 2023 年総合大会, B-6-22, 2023 年 3 月
- [2] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, ISP の ICN 導入が他 ISP の収益に与える影響の分析, 電子情報通信学会, 第 24 回 ICN 研究会ワークショップ, 2023 年 8 月
- [3] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, ICN 普及のためのナッシュ交渉解を用いた ISP 間の調整金設定法, 電子情報通信学会総合大会, BPO-1-08, 2024 年 3 月
- [4] 伊藤 枉基, 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, 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ (IA) 研究会, IA2023-79, 2024 年 3 月
- [5] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, 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, 電子情報通信学会 複雑コミュニケーションサイエンス (CCS) 研究会, CCS2024-32,, 2024 年 7 月
- [6] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, ICN 普及のためのシャープレイ値を用いた ISP 間の調整金システム, 2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, N-2-09, 2024 年 9 月
- [7] Masaki Ito and Noriaki Kamiyama, Money Adjustment Among ISPs Based on Cooperative Games for ICN Promotion, IEEE CyberSciTech 2024, Nov. 2024
- [8] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, 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, 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ (IA) 研究会, 2025 年 3 月
- [9] 伊藤 枉基, 上山 憲昭, ICN 普及のための ISP 間の調整金システムにおける安定的な収益分配法, 電子情報通信学会総合大会, 2025 年 3 月