

## ソーシャル性を考慮した情報指向ネットワークの特性分析

本田 紘大<sup>†</sup> 中村 遼<sup>†</sup> 上山 憲昭<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 福岡大学 工学部

〒 814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1

<sup>††</sup> 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: <sup>†</sup>{tl181239,r-nakamura}@fukuoka-u.ac.jp, <sup>††</sup>kamiaki@fc.ritsumeimei.ac.jp

あらまし 近年では、SNS (例: Twitter や Facebook) の成長に伴い、ユーザにより生成されたコンテンツが急激に増加している。また、SNS 上において、ユーザ間のやりとりが活発に行われるため、テキストや動画のデータに対するトラフィック量が増加している。SNS において高効率なコンテンツ配信を実現するためのネットワークアーキテクチャとして、コンテンツ配信ネットワーク (CDN: Content Delivery Network) や情報指向ネットワーク (ICN: Information-Centric Networking) に代表されるキャッシュネットワークが有望視されている。キャッシュネットワークが効率的に機能するためには、キャッシュノード (CDN におけるキャッシュサーバや ICN におけるルータ) で動作するキャッシュ制御方式やキャッシュ置き換え方式を適切に設計することが鍵となる。ただし、SNS におけるユーザ間の交友関係を表すソーシャルネットワークが有する様々な特徴を十分に考慮する必要がある。そこで、本稿では、SNS のコンテンツ配信基盤として ICN を導入することを想定し、ソーシャルネットワークの特徴を考慮した ICN の特性を多面的に分析する。特に、ソーシャルネットワークの主要な特徴の一つである、影響力の強いユーザ (インフルエンサー) に着目し、影響力の強いユーザの選択方法やその割合が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を調査する。その結果、影響力の強いユーザを決定する中心性指標に応じてキャッシュヒット率が大きく異なることや、影響力の強いユーザの割合を適切に決定することでキャッシュヒット率が大幅に向上することなどを示す。

キーワード 情報指向ネットワーク, ソーシャルネットワーク, コンテンツ配信, 性能解析

## Characteristic Analysis of Socially-Aware Information-Centric Networking

Kodai HONDA<sup>†</sup>, Ryo NAKAMURA<sup>†</sup>, and Noriaki KAMIYAMA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Engineering, Fukuoka University

8-19-1 Nanakuma, Jonan, Fukuoka, Fukuoka 814-0180, Japan

<sup>††</sup> College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{tl181239,r-nakamura}@fukuoka-u.ac.jp, <sup>††</sup>kamiaki@fc.ritsumeimei.ac.jp

**Abstract** In recent years, with the rapid growth of SNS (Social Networking Service), e.g., Twitter and Facebook, the amount of user-generated contents has dramatically increased. In addition, the amount of traffic for text and video data is increasing due to the active interaction among SNS users. One of promising network architectures to realize highly-efficient content delivery in SNS is *cache network*, e.g., CDN (Content Delivery Network) and ICN (Information-Centric Networking). In order for the cache network to effectively operate, the key is to appropriately design the caching strategy and the cache-replacement algorithm at caching nodes, e.g., cache server in CDNs and router in ICNs. However, it is necessary to sufficiently consider various factors of a social network representing the social relationship among SNS users. Therefore, in this paper, we assume that ICN is introduced as a content distribution infrastructure for SNS, and extensively analyze the characteristics of the socially-aware ICN. In particular, we focus on the influential user called *influencer*, which is one of typical features of social networks, and investigate the effect of the selection method of influential users and their ratio on the content caching in ICNs. Consequently, we reveal that the cache hit ratio differs significantly according to centrality measures that determine influential users, and that the cache hit ratio can be significantly improved by appropriately determining the ratio of influential users.

**Key words** Information-Centric Networking, Social Network, Content Delivery, Performance Analysis

## 1 はじめに

近年では、SNS (例: Twitter や Facebook) の成長に伴い、ユーザにより生成されたコンテンツが急激に増加している。また、SNS 上において、ユーザ間のやりとりが活発に行われるため、テキストや動画像のデータに対するトラフィック量が増加している。

SNS において高効率なコンテンツ配信を実現するためのネットワークアーキテクチャとして、ネットワーク内におけるコンテンツの再利用が可能となるキャッシュネットワークが有望視されている。現在広く利用されているコンテンツ配信ネットワーク (CDN: Content Delivery Network) [1] では、ユーザは、コンテンツのオリジナルを保有するサーバ (オリジンサーバ) だけでなく地理的に隣接するキャッシュサーバからコンテンツを取得することができる。また、将来のインターネットアーキテクチャとして注目されている情報指向ネットワーク (ICN: Information-Centric Networking) [2] では、ネットワーク中のルータがコンテンツの複製を一時的に保持することができる。このため、オリジンサーバだけでなくルータからコンテンツを配信することができる。ネットワーク内におけるキャッシュを活用することにより、コンテンツ配送遅延の短縮やコンテンツ可用性の向上が期待できる。

キャッシュネットワークが効率的に機能するためには、キャッシュノード (CDN におけるキャッシュサーバや ICN におけるルータ) で動作するキャッシュ制御方式やキャッシュ置き換え方式を適切に設計することが鍵となる。キャッシュ制御方式は、キャッシュノードがコンテンツをキャッシュに挿入するかどうかを決定する方式である。一方、キャッシュ置き換え方式は、キャッシュがコンテンツにより完全に占有されているときに、キャッシュから破棄するコンテンツを決定する方式である。キャッシュネットワークの通信性能はコンテンツの人気度やコンテンツ要求のルーティング方式などの様々な要因に依存するため、様々なキャッシュ制御方式やキャッシュ置き換え方式が検討されている [3]。

ただし、キャッシュネットワークを利用した SNS のコンテンツ配信では、SNS におけるユーザ間の交友関係を表すソーシャルネットワークが有する様々な特徴を十分に考慮する必要がある。ソーシャルネットワークの代表的な特徴として、影響力の強いユーザ (インフルエンサ) の存在やコミュニティ構造が挙げられる [4]。素朴には、影響力の強いユーザが生成するコンテンツは多数のユーザに要求されるため、このようなコンテンツをネットワーク内で優先的にキャッシュすることが望ましい。また、異なるコミュニティに属するユーザ間のやりとりと比較して、同一コミュニティに属するユーザ間のやりとりが頻繁に発生すること (文献 [5] を参照) から、コンテンツの局所性を考慮した上でコンテンツをキャッシュすることが望ましい。このように、ソーシャルネットワークの特徴を考慮した上でキャッシュネットワークを設計することが重要である。

これまで、ソーシャルネットワークの特徴を考慮したキャッシュネットワーク (例: CDN や ICN) の設計が検討されている

が、ソーシャルネットワークの特徴とキャッシュネットワークにおけるコンテンツキャッシングの相互作用は十分に明らかにされていない。特に、文献 [6] では、ソーシャルネットワークにおける影響力の強いユーザの存在を考慮したキャッシュ制御方式が提案されているが、影響力の強いユーザをどのように決定すればよいか、また、どの程度のユーザを影響力の強いユーザとみなすのがよいかは十分に検討されていない。

そこで、本稿では、SNS のコンテンツ配信基盤として、CCN (Content-Centric Networking) [7] や NDN (Named Data Networking) [8] に代表される ICN を導入することを想定し、ソーシャルネットワークの特徴を考慮した ICN の特性を分析する。具体的には、ソーシャルネットワークの主要な特徴の一つである、影響力の強いユーザに着目し、影響力の強いユーザの選択方法やその割合が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を多面的に調査する。本研究によりソーシャルネットワークにおける影響力の強いユーザとコンテンツキャッシングの相互作用を定量的に明らかにした上で、ソーシャル性を考慮した ICN の設計を目指す。

本稿の貢献を以下にまとめる。

- シミュレーションおよび数学的解析を併用することにより、ソーシャルネットワークにおける影響力の強いユーザの決定方法やその割合が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を多面的に分析する。
- ソーシャルネットワークのトポロジに依らず、影響力の強いユーザを決定する中心性指標に応じて、キャッシュヒット率 (ユーザがルータのキャッシュからコンテンツを取得できる確率) が大きく異なることを示す。
- ソーシャルネットワークの次数分布がべき則に従う場合には、影響力の強いユーザの割合を適切に決定することで、キャッシュヒット率が大幅に向上することを示す。また、その一方で、ソーシャルネットワークの次数分布がべき則に従わない場合 (例えば、次数分布がポアソン分布である場合) には、影響力の強いユーザを決定することによるコンテンツキャッシングへの恩恵は限定的であることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 節では、ソーシャルネットワークの特徴を考慮したキャッシュネットワークの研究動向を紹介する。3 節では、シミュレーションにより、影響力の強いユーザの選択方法が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を調査する。さらに、4 節では、数学的解析を利用し、影響力の強いユーザの割合が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を調査する。最後に 5 節では、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 関連研究

SNS の普及に伴うトラフィック量の増大を解決するために、ネットワーク内におけるコンテンツキャッシングを活用した手法が研究されている [9,10]。ただし、これらの研究では、既存のキャッシュネットワークをそのまま導入するのではなく、ソーシャルネットワークの特徴を考慮したキャッシュネットワークを設計している。文献 [9] は、実データを分析することにより、

SNS におけるコンテンツ配信の特徴として、コンテンツの拡散範囲はそのコンテンツを生成したユーザから周辺に位置するユーザに限定されることや、コンテンツの要求には地理的な局所性が発生することを明らかにしている。これらの特徴を考慮した上で、エッジサーバにおけるキャッシュ置き換え方式を提案し、典型的なキャッシュ置き換え方式(例: LRU や LFU)と比較して、効率的なコンテンツ配信が可能となることを実験により示している。また、文献[10]は、CDN を利用することにより、SNS ユーザにより生成されたビデオコンテンツを効率的に配信する方式を提案している。SNS におけるユーザ間の交友関係・地理的な局所性・ユーザの嗜好性を基にユーザをコミュニティに分類し、同一コミュニティに属するユーザ間でビデオコンテンツを共有できるような、キャッシュ置き換え方式とキャッシュサーバの選択方式を提案している。

さらに、近年では、次世代のネットワークアーキテクチャである ICN の SNS におけるコンテンツ配信への応用や、ソーシャルネットワークの特性を考慮した ICN の設計に対する検討もはじまっている[6, 11]。文献[11]は、SNS(例: Twitter)のコンテンツ配信基盤として、ICN を実現する代表的なネットワークアーキテクチャである NDN [8] を導入することによる恩恵を調査している。具体的には、数学的解析により、階層型構造を有するネットワークポロジを対象とし、コンテンツ配送に要するホップ数やネットワーク中を転送されるトラフィック量を導出している。また、いくつかの数値例により、ソーシャルネットワークの主要な特徴の一つであるユーザの地理的な局所性が高まるにつれ、NDN におけるコンテンツキャッシングによる効果が高まることが明らかにされている。文献[6]は、ソーシャルネットワークにおける影響力が強いユーザの存在を考慮した、ICN のためのキャッシュ制御方式 SACS (Socially-Aware Caching Strategy) を提案している。SACS では、ルータは全てのコンテンツを一律にキャッシュするのではなく、影響力が強いユーザが発行したコンテンツのみをキャッシュする。シミュレーションおよび実機実験により、SACS が有効に動作すること(例えば、キャッシュヒット率が大幅に改善される)が示されている。文献[6]では、ルータにおけるキャッシュ対象となるコンテンツを影響力の強いユーザが生成したコンテンツに限定することによる恩恵が示されているが、影響力が強いユーザの選択方法やその割合による影響は十分に明らかにされていない。

### 3 シミュレーション

本節では、ユーザの影響力を表す指標(例: 次数中心性)を様々に変化させることで、影響力の強いユーザの選択方法がキャッシュヒット率に与える影響をシミュレーションにより調査する。

#### 3.1 手法

ルータ間の接続関係を表すグラフとして、ER (Erdős-Rényi) モデル [12] により生成したランダムグラフ(ノード数: 100, リンク数: 200, 平均経路長: 2.68)を用いた。また、ユーザ間の交友関係を表すグラフとして、Last.fm(ノード数: 1,843, リン

ク数: 12,268)<sup>(注1)</sup>および Facebook(ノード数: 4,039, リンク数: 88,234)<sup>(注2)</sup>のデータセットを用いた。ただし、Last.fm のデータセットに含まれるネットワークは非連結であったため、最大連結成分を構成する部分ネットワークを用いた。本稿では、ソーシャルネットワーク上の各ユーザをルータにランダムに収容した。

ユーザは、ソーシャルネットワーク上のユーザの行動モデル [13] に従って、友人関係にあるユーザ(つまり、グラフ上の隣接ユーザ)が保有するコンテンツに対する要求を繰り返し発行するとともに、新たなコンテンツを配信する。ユーザ行動モデルにおけるパラメータ設定は文献[6]における実験条件と同一とした。ユーザ行動モデルの詳細は文献[6, 13]を参照されたい。

ルータにおけるキャッシュ制御方式として、文献[6]で提案されている SACS を用いた。SACS では、ルータは、全てのコンテンツを一律にキャッシュするのではなく、影響力の強いユーザが発行したコンテンツのみをキャッシュする。ルータにおけるキャッシュサイズは 10 [content] とし、キャッシュ置き換え方式は LRU とした。

本稿では、与えられた中心性指標によって各ユーザの中心性を求め、中心性の高い上位  $p$  割のユーザを影響力の強いユーザとした。本稿では、8 種類の中心性指標(次数中心性・媒介中心性・近接中心性・固有ベクトル中心性・PageRank [14]・ $k$  コア指標 [15]・VoteRank [16]・CI (Collective Influence) [17])を用いた。次数中心性・媒介中心性・近接中心性・固有ベクトル中心性・PageRank・ $k$  コア指標は複雑ネットワークの分野における典型的な中心性指標である。一方、VoteRank や CI は、近年に提案された指標であり、効率的な情報拡散を実現できることが知られている。これらの中心性指標の詳細は当該文献を参照されたい。本シミュレーションでは、 $p = 0.1$  とした。影響力の強いユーザの割合  $p$  による影響は 4 節で議論する。

シミュレーションには、我々が開発した ICNSIM (ICN Simulator) を利用し、性能指標として、キャッシュヒット率(ユーザが発行したコンテンツ要求のうち、対応するコンテンツが経路上のルータのキャッシュから返送された割合)を計測した。与えられた条件下において、100,000 [slot] のシミュレーションを 10 回繰り返したときの、ネットワーク全体の平均キャッシュヒット率の平均を求めた。

#### 3.2 結果

8 種類の中心性指標を用いたときの、Last.fm におけるネットワーク全体の平均キャッシュヒット率を図 1 に示す。図中には、比較のため、ランダムに影響力の強いユーザを選択したときの結果もあわせて示している。まず、これらの結果から、中心性指標に従って影響力の強いユーザを選択することで、キャッシュヒット率が大幅に改善されることなどがわかる。特に、媒介中心性・PageRank・VoteRank を用いた場合のキャッシュヒット率が最も高くなるが、固有ベクトル中心性や  $k$  コア指標を用いた

(注1) : <https://grouplens.org/datasets/hetrec-2011/>

(注2) : <https://snap.stanford.edu/data/ego-Facebook.html>

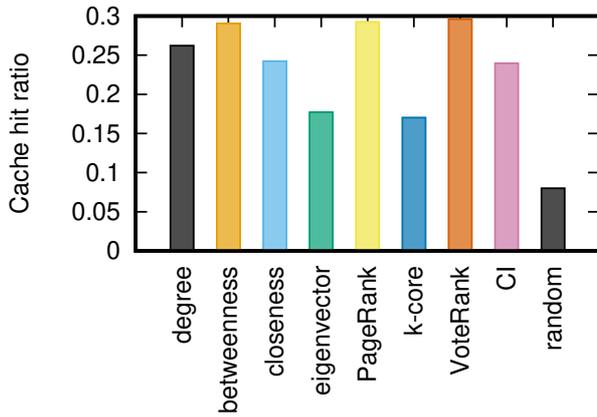


図 1: 8 種類の中心性指標を用いたときの平均キャッシュヒット率 (Last.fm)

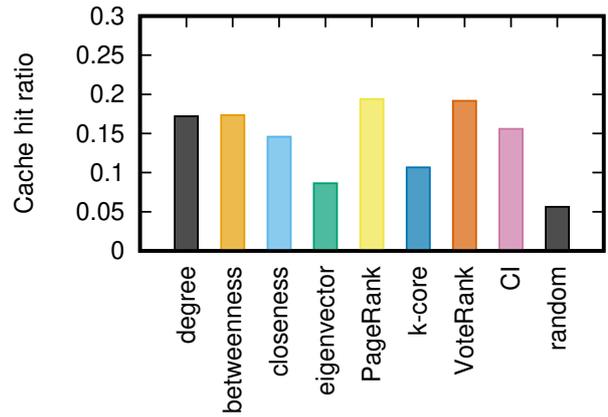


図 2: 8 種類の中心性指標を用いたときの平均キャッシュヒット率 (Facebook)

場合のキャッシュヒット率が最も低くなることなどがわかる。

次に、Facebook におけるネットワーク全体の平均キャッシュヒット率を図 2 に示す。図 1 と同様に、8 種類の中心性指標を用いたときの結果と、ランダムに影響力の強いユーザを選択したときの結果を図中に示している。Last.fm と比較して、Facebook は大規模なネットワークであり、ユーザにより生成されるコンテンツ数も増大するため、当然ながら、全体的な平均キャッシュヒット率は低下する。ただし、中心性指標による平均キャッシュヒット率の大小関係は、Last.fm の場合 (図 1) と Facebook の場合 (図 2) でほとんど差がないことがわかる。

以上の結果より、影響力の強いユーザを媒介中心性や PageRank に従って決定することにより、他の中心性指標と比較して、ネットワーク全体の平均キャッシュヒット率が向上する。ただし、媒介中心性や PageRank を求めるためには、ネットワークの規模に応じた計算量が必要となることに注意されたい。このため、大規模なソーシャルネットワークを対象とする場合には、計算量が少なく、媒介中心性や PageRank の平均キャッシュヒット率に近い値を達成できる次数中心性も有効である。

## 4 解析

本節では、数学的解析により、ソーシャルネットワークの次数分布が与えられたときのキャッシュヒット率を近似的に導出するとともに、いくつかの数値例により、影響力の強いユーザの割合とキャッシュヒット率の関係を分析する。

### 4.1 解析モデル

本稿では、複数の ICN ルータから構成されるキャッシュネットワーク上において、社会的な交友関係を有するユーザ間のコンテンツ配送を考える。

まず、ユーザ数およびユーザ間の交友関係を表すソーシャルネットワークの次数分布を  $N$  および  $P(k)$  とそれぞれ表記する。

ユーザは各 ICN ルータにランダムに収容されているものとし、各ユーザは、ソーシャルネットワーク上において隣接する

ユーザが生成したコンテンツに対して、コンテンツ取得要求を繰り返し発行する。ユーザによって発行された要求パケットは ICN ルータ上を転送され、ネットワーク内で発見された当該コンテンツが応答パケットとしてユーザに返送される。

ICN ルータにおけるキャッシュ制御方式は SACS [6] であると仮定し、ICN ルータは影響力が強いユーザが生成したコンテンツのみをキャッシュする。本稿では、ソーシャルネットワークにおけるユーザの中心性指標および影響力の強いユーザの割合に基づいて、影響力の強いユーザを決定する。具体的には、ユーザの次数中心性と影響力の強いユーザの割合  $p$  ( $0 \leq p \leq 1$ ) に基づいて、ソーシャルネットワークにおける次数の高い上位  $pN$  人のユーザを影響力の強いユーザとみなす。

ICN ルータにおけるキャッシュの大きさを  $B$  [content] と表記する。また、キャッシュ置き換え方式は LRU とする。

### 4.2 キャッシュヒット率の導出

本稿では、キャッシュヒット率 (ユーザがコンテンツを要求したときに、経路上のいずれかの ICN ルータのキャッシュから当該コンテンツを取得できる確率) の期待値を導出する。キャッシュヒット率の期待値を  $H$  と表記する。

ユーザは自身に隣接する全てのユーザに対してコンテンツ要求を発行するため、キャッシュヒット率  $H$  は、影響力の強いユーザが生成したコンテンツに対するキャッシュヒット率  $H^+$  と、そうでないユーザが生成したコンテンツに対するキャッシュヒット率  $H^-$  により構成される。あるユーザに隣接するユーザが影響力の強いユーザである割合を  $q$  と表記すれば、キャッシュヒット率  $H$  は次式で与えられる。

$$H = qH^+ + (1 - q)H^- \quad (1)$$

ICN ルータにおけるキャッシュ制御方式として SACS が動作することを仮定しているため、ICN ルータは影響力の強いユーザが生成したコンテンツのみをキャッシュし、そうでないユーザが生成したコンテンツをキャッシュしない。従って、明らかに  $H^- = 0$  であるため、キャッシュヒット率は次式で表すことが

できる。

$$H = qH^+ \quad (2)$$

以降では、まず、あるユーザに隣接しているユーザが影響力の強いユーザである割合  $q$  を考える。ソーシャルネットワークの次数分布  $P(k)$  を用いて、ユーザに接続されているユーザの次数分布  $Q(k)$  は、

$$Q(k) = \frac{(k+1)P(k+1)}{\langle k \rangle} \quad (3)$$

で与えられる [14]。ここで、 $\langle k \rangle$  はソーシャルネットワークの平均次数であり、 $\langle k \rangle = \sum_{k=1}^{\infty} kP(k)$  である。

影響力の強いユーザに対する次数の下限を  $k_{\min}^+$  と表記すれば、ソーシャルネットワークにおいて次数が  $k_{\min}^+$  以上であるユーザは影響力の強いユーザとみなすことができる。このため、次数分布  $Q(k)$  を用いて、あるユーザに隣接しているユーザが影響力の強いユーザである割合  $q$  は次式で与えられる。

$$q = \sum_{k=k_{\min}^+}^{\infty} Q(k) \quad (4)$$

影響力の強いユーザに対する次数の下限  $k_{\min}^+$  は、次数分布  $P(k)$  の累積分布関数  $F(k)$  の逆関数より求めることができる。

$$k_{\min}^+ = F^{-1}(1-p) \quad (5)$$

次に、影響力の強いユーザが生成したコンテンツに対するキャッシュヒット  $H^+$  を考える。影響力の強いユーザが生成したコンテンツに対するキャッシュヒット率  $H^+$  は、ユーザがコンテンツ要求を発行したときに、経路上のいずれかの ICN ルータにおいてキャッシュヒットが発生する確率である。ある単一の ICN ルータにおけるキャッシュヒット率を  $h$  と表記すれば、

$$H^+ = 1 - (1-h)^{\langle \ell \rangle + 1} \quad (6)$$

である。ここで、 $\langle \ell \rangle$  は、ICN ルータから構成されるキャッシュネットワークの平均経路長である。

キャッシュ制御方式が SACS である場合には、キャッシュネットワークにおいてキャッシュ対象となるコンテンツは  $pN$  種類とみなすことができる。このため、ICN ルータにおけるキャッシュの大きさ  $B$  を用いて、キャッシュヒット率  $h$  は近似的に次式で与えられる。

$$h \simeq \min\left(\frac{B}{pN}, 1\right) \quad (7)$$

### 4.3 数値例

数値例により、ソーシャルネットワークの次数分布を様々に変化したときの、影響力の強いユーザの割合とキャッシュヒット率の関係を調査する。ソーシャルネットワークの次数分布をポアソン分布・指数分布・べき分布の確率質量関数により与えた。

- ポアソン分布 (poisson)

$$P(k) = e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle k \rangle^k}{k!} \quad (8)$$

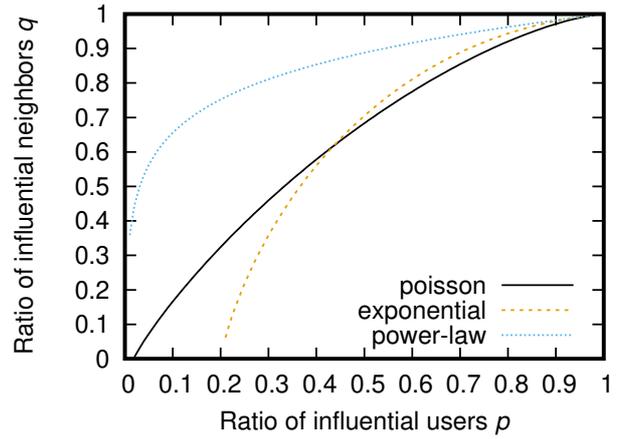


図3: 影響力の強いユーザの割合と、隣接ユーザが影響力の強いユーザである割合の関係

- 指数分布 (exponential)

$$P(k) = (1 - e^{-\mu})e^{-\mu k} \quad (9)$$

- べき分布 (power-law)

$$P(k) = \frac{k^{-\alpha}}{\zeta(\alpha)} \quad (10)$$

ここで、 $\mu$  および  $\alpha$  はパラメータであり、 $\zeta(\alpha)$  はリーマンのゼータ関数である。確率質量関数の平均が平均次数  $\langle k \rangle$  と等しくなるように  $\mu$  および  $\alpha$  をそれぞれ決定した。本数値例では、ソーシャルネットワークのユーザ数を  $N = 10,000$  とし、平均次数  $\langle k \rangle = 4$  とした。

特に断りのない限り以下のパラメータを用いた; ICN ルータにおけるキャッシュの大きさ  $B = 100$  [content], キャッシュネットワークの平均経路長  $\langle \ell \rangle = 3$ 。

影響力の強いユーザの割合とキャッシュヒット率の関係を議論する前に、あるユーザに隣接しているユーザが影響力の強いユーザである割合 (式 (4)) が次数分布に応じてどのように異なるかを確認する。図3に、影響力の強いユーザの割合と、隣接ユーザが影響力の強いユーザである割合の関係を示す。図中には、3種類のソーシャルネットワークの次数分布 (“poisson”・“exponential”・“power-law”) による結果を示している。この結果より、次数分布がべき分布である場合には、少数の高次数ユーザの存在により、影響力の強いユーザの割合が小さかったとしても、影響力の強い隣接ユーザの割合は大きくなることを確認できる。

図4に、影響力の強いユーザの割合とキャッシュヒット率の関係を示す。図3と同様に、図中には、3種類のソーシャルネットワークの次数分布による結果を示している。この結果より、まず、キャッシュヒット率は、ソーシャルネットワークの次数分布によって大きく異なることがわかる。次数分布がポアソン分布や指数分布である場合には、キャッシュヒット率のピーク値と  $p = 1$  である場合のキャッシュヒット率では差がほとんどないことがわかる。つまり、これらの次数分布の場合には、

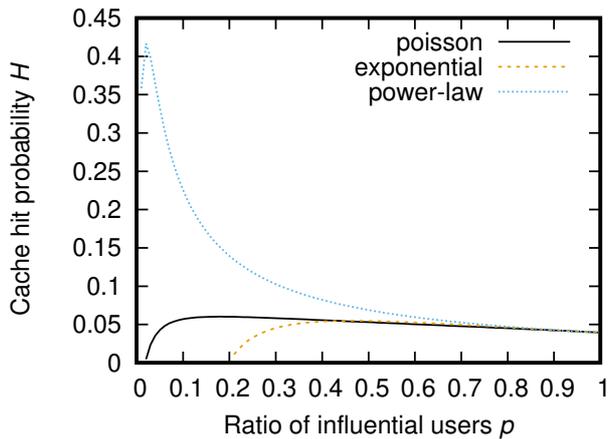


図 4: 影響力の強いユーザの割合とキャッシュヒット率の関係

影響力の強いユーザを決定することによるコンテンツキャッシングへの恩恵は限定的である。一方、次数分布がべき分布である場合には、影響力の強いユーザの割合  $p$  に対してキャッシュヒット率は  $p = 0.02$  付近において上に凸となる。これは、次数分布がべき分布である場合には、影響力の強いユーザの割合  $p$  が小さかったとしても、隣接ユーザが影響力の強いユーザである割合 (式 (4)) は大きくなるため (図 3 を参照), また、少数のユーザを影響力の強いユーザとみなすことで、ICN ルータにおけるキャッシュヒット率 (式 (7)) が増加するためである。従って、ソーシャルネットワークにおける影響力の強いユーザの割合を適切に決定することで、 $p = 1$  の SACS に相当する従来のキャッシュ制御方式と比較して、キャッシュヒット率が大幅に改善されることが期待できる。

## 5 まとめと今後の課題

本稿では、シミュレーションおよび数学的解析を併用することにより、ソーシャルネットワークの特徴を考慮した ICN の特性を分析した。具体的には、ソーシャルネットワークの主要な特徴の一つである、影響力の強いユーザに着目し、影響力の強いユーザの選択方法やその割合が ICN のコンテンツキャッシングに与える影響を多面的に調査した。その結果、本稿で用いた 8 種類の中心性指標の中で、媒介中心性や PageRank を用いることにより平均キャッシュヒット率が向上することがわかった。また、ソーシャルネットワークの次数分布がべき則に従う場合には、影響力の強いユーザの割合を適切に決定することで、平均キャッシュヒット率が大幅に向上することがわかった。

今後の課題として、ソーシャルネットワークにおけるユーザの地理的な局所性を考慮した場合の評価や、本稿で構築した近似解析を利用した、ICN のためのキャッシュ制御方式の設計などが挙げられる。

## 謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 21H03436 および 21H03437 の助成を受けたものである。

- [1] A. Vakali and G. Pallis, "Content delivery networks: Status and trends," *IEEE Internet Computing*, vol. 7, pp. 68–74, Dec. 2003.
- [2] G. Xylomenos *et al.*, "A survey of information-centric networking research," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 1024–1049, 2014.
- [3] M. Yamamoto, "A survey of caching networks in content oriented networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E99–B, pp. 961–973, May 2016.
- [4] S. Tsugawa, "A survey of social network analysis techniques and their applications to socially aware networking," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E102–B, pp. 17–39, Jan. 2019.
- [5] F. Xia, L. Liu, J. Li, J. Ma, and A. V. Vasilakos, "Socially aware networking: A survey," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, pp. 904–921, Sept. 2015.
- [6] C. Bernardini, T. Silverston, and O. Fester, "Socially-aware caching strategy for content centric networking," in *Proceedings of the 2014 IFIP Networking Conference*, pp. 1–6, June 2014.
- [7] V. Jacobson, D. K. Smetters, J. D. Thornton, M. F. Plass, N. H. Briggs, and R. L. Braynard, "Networking named content," in *Proceedings of the 5th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT 2009)*, pp. 1–12, Dec. 2009.
- [8] L. Zhang *et al.*, "Named data networking," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, pp. 66–73, July 2014.
- [9] Z. Wang, L. Sun, X. Chen, W. Zhu, J. Liu, M. Chen, and S. Yang, "Propagation-based social-aware replication for social video contents," in *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimedia (MM 2012)*, pp. 29–38, Nov. 2012.
- [10] H. Hu, Y. Wen, T.-S. Chua, J. Huang, W. Zhu, and X. Li, "Joint content replication and request routing for social video distribution over cloud CDN: A community clustering method," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, pp. 1320–1333, July 2016.
- [11] P. Truong, B. Mathieu, and J.-F. Peltier, "Networking impact of a local-aware content-based delivery for twitter-like applications," in *Proceedings of the 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks (ICIN 2015)*, pp. 224–230, Feb. 2015.
- [12] P. Erdős and A. Rényi, "On random graphs I," *Mathematica*, vol. 6, pp. 290–297, Nov. 1959.
- [13] F. Benevenuto, T. Rodrigues, M. Cha, and V. Almeida, "Characterizing user behavior in online social networks," in *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement (IMC 2009)*, pp. 49–62, Nov. 2009.
- [14] M. Newman, *Networks*. Oxford University Press, 2010.
- [15] S. B. Seidman, "Network structure and minimum degree," *Social Networks*, vol. 5, pp. 269–287, Sept. 1983.
- [16] J.-X. Zhang, D.-B. Chen, Q. Dong, and Z.-D. Zhao, "Identifying a set of influential spreaders in complex networks," *Scientific Reports* 6, pp. 1–9, June 2016.
- [17] F. Morone and H. A. Makse, "Influence maximization in complex networks through optimal percolation," *Nature*, vol. 524, pp. 65–68, Aug. 2015.