

# CCN におけるコンテンツ配信者移動環境のための 移動管理とキャッシュ配置法

夏川清 湯素華 小花貞夫

概要：CCN におけるコンテンツ配信者が移動する環境における効果的な移動管理とキャッシュ配置の方式を提案し、シミュレーションによりその有効性を検証した。node のグループ化による階層的な経路情報管理により、配信者の移動により生じた通信オーバーヘッドを最大 48%削減ができた。また、各 node が動配信者までの距離変化を常に更新し、配信者までの距離と要求される回数に基づいてコンテンツごとのキャッシュ貢献度を計算してキャッシュを置くか否かを決定し、またグループ内の node 同士が互いのキャッシュ情報を把握し、グループ内他 node のキャッシュを利用することによる協力的なキャッシュ配置方式により、移動による影響を従来方式より最大 62%、平均ホップ数を最大 23.5%減少させた。

**キーワード**：コンテンツ指向ネットワーク(CCN)、経路管理、キャッシュ配置、コンテンツ配信者の移動

## Route Management and Cache Arrangement for Supporting Mobility of Contents Providers in CCN

**Keywords**: Content Centric Network(CCN), Route Management, Cache Arrangement, Mobility of Contents Providers

### 1. はじめに

近年、インターネット上のトラフィックが急激に増加しており、Cisco の調査データにより、コンテンツ配信するためのトラフィックは、2021 年までにインターネットトラフィック総量の 71%も占めるようになると予測されている [1]。従来の IP 中心のネットワークは、配信者から要求者へ end-to-end でコンテンツを配信するため、配信者が遠方にある場合や経路上で混雑しているときには、配信効率が劣化する恐れがある。そのために、効率的なコンテンツ配信のための新たなネットワークアーキテクチャとしてコンテンツ指向ネットワーク(Content Centric Network, CCN)が提案され注目されている [2]。

CCN の課題の一つとして移動性 (mobility) サポートがある。オリジナルの CCN ではコンテンツ要求者の移動に対する考慮はされているが、コンテンツ配信者の移動は全く考慮されていない。

これに対して、配信者の移動をサポートするために、ルーティング情報の正確性を保つための移動管理手法が提案されている [3]。しかしこの既存手法では、配信者が移動するたびに直前にいった node とネットワークに登録した home node の両方に移動を通知するレポートを送信する必要があり、通信オーバーヘッドが高い大きい。

また、配信者の移動環境下、移動配信者から各 node への距離(ホップ数)がよく変更される。既存のキャッシュ配置方式はその特徴を考慮せず、node に近い配信者と遠い配信者のコンテンツを同じ判断基準でキャッシュを行うため、必ずしも効率が良いわけではない。

本稿では、CCN の node をグループ化し、配信者の移動をサポートする既存手法の通信トラフィックを削減する移動管理方式を提案する。また、配信者の移動を考慮し、node は配信者までの距離を常に更新を行い、は各コンテンツを持つことによるネットワークへの貢献度 (ホップ数削減効果と要求回数の積) を配信者までの距離により自律的に計算し、貢献度が高いコンテンツを優先的にキャッシュする。node がグループ内部ルーティングテーブルをもち、配信者ではなく該当コンテンツのコピーを持つ同じグループの node 同士にコンテンツ要求者からのパケットをルーティングすることにより、協力的なキャッシュ配置方式を提案する。

### 2. コンテンツ指向ネットワーク(CCN)

#### 2.1 CCN の概要

図 1 に示すように、CCN では、コンテンツの要求者は、コンテンツ配信者 (以下、配信者) のアドレスではなくコ

コンテンツ名を指定した Interest パケットを発行する(①). 配信者からは要求されたコンテンツが Data パケットにより返送される(②). その際、途中の中継 node にコンテンツがキャッシュされ(③), 同じコンテンツが要求された際に活用され、配信の効率化が図られる(④). これらの機能を提供するため各 node は、キャッシュを格納する CS(Content Store), Interest パケットを配信者に届けるためのルーティング情報 FIB(Forwarding Information Base)および Data パケット返送のための返送リスト PIT(Pending Interest Table)を持つ.

コンテンツ名の例:uec/obanalab/sample.txt

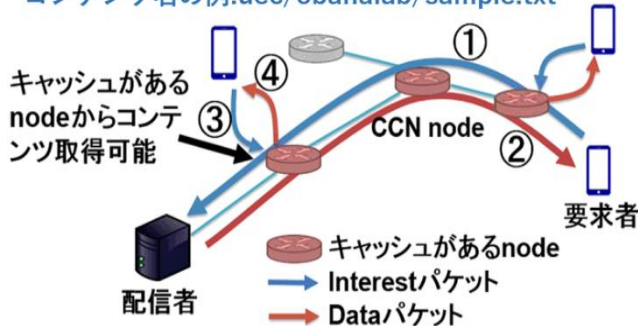


図1 CCN の概要

## 2.2 CCN における配信者移動サポートの現況と課題

オリジナルの CCN[2]ではコンテンツ配信者の移動は考慮されていない。

C. Fang らは、CCN における移動に関する研究現状について行った調査[4]と M. Zhang らによるキャッシュ配置方式に関する調査[5]により、コンテンツ要求者を対象とする研究がされているが、移動配信者を対象とするキャッシュ配置方式がまだ少ない。

また、H. Farahat らの研究は、配信者が移動する際に、配信者が持つどのコンテンツがこれから要求されるかを予測し、事前に該当コンテンツをネットワークのある node の CS に入れる方式が提案されている[6]。しかし、この方式では要求者の要求状況と配信者の移動先を正確に予測しなくてはならない。また各 node は自律的に判断ではなく、すべての node にキャッシュ手法を指示する必要がある。

そこで配信者が移動する検討を行う際には、以下の3つが重要である。

### ① 移動管理：

配信者が移動するたびに、ネットワーク内の配信者までのルーティング情報(FIB)を更新する必要がある。

### ② キャッシュ配置：

配信者が移動すると、配信者から各 node までの距離が変更される。オリジナル CCN[2]のキャッシュ配置方式は配信者までの距離を配慮せず、どの node でもキャッシュを行い、有限なキャッシュ空間が有効に利用されていない可能性がある。

### ③ 方式の実現しやすさ：

ネットワーク内のすべての情報を収集統一して分析することが困難であるため、自律分散方式の実現性を考慮すべきである。

## 3. 先行研究

CCN における、配信者の移動管理とキャッシュ配置制御に関する主な先行研究を述べる。

### 3.1 配信者の移動管理

#### 3.1.1 Publisher Mobility support protocol in CCN(PMC)方式

PMC 方式[3]では、配信者がネットワークに最初に登録された node を Home node とする。移動配信者への最新の経路情報を常に Home node の FIB に反映する。配信者は、移動のたびに直前の移動先 node と Home node 両方に Mobility report 要求(MR 要求)を送信し、それに対する Mobility report 応答(MR 応答)を受信する。その際、経路上の途中の node(中継 node)では FIB を更新する。MR 要求は Interest パケットにより、また MR は Data パケットにより運ばれる。

#### 3.1.2 既存移動管理方式の課題

PMC 方式では、配信者が短距離の移動でも、移動するたびに直前の移動先 node と、Home node 両方に MR 要求を送信しその応答を受信する必要がある、通信オーバーヘッドが大きい。

### 3.2 キャッシュ配置

キャッシュをどの node に配置するのが良いのかに関して、Y. Li らの研究は、配信者から受信者までパス上に一箇所だけコンテンツを置き、また他ノードのルーティング情報を持つことにより協力キャッシュを行う方式を提案した[7]。しかし、彼らの研究は配信者の移動を考慮せず、配信者が移動する際に、配信者から受信者までのパス上にコンテンツが複数存在する可能性が出てくる。

また、N. Laoutaris らの研究[8]では、Leave Copy Down(以下、LCD)を、また、Psaras らの研究[9]では Move Copy Down(以下、MCD)、Prob 方式を提案した。これらは CCN でよく用いられるキャッシュ配置方式であり、本稿で提案する方式の比較対象とする。

以下、これらの方式の概要を述べる。

#### 3.2.1 Leave Copy Everywhere(LCE)方式

LCE はオリジナル CCN[2]で用いられる方式である。

図2のように、Interest パケットの送信経路上の node または配信者に要求するコンテンツが存在する場合(以下、キャッシュヒット)、Data パケットを受け取った全ての node がキャッシュを行う。

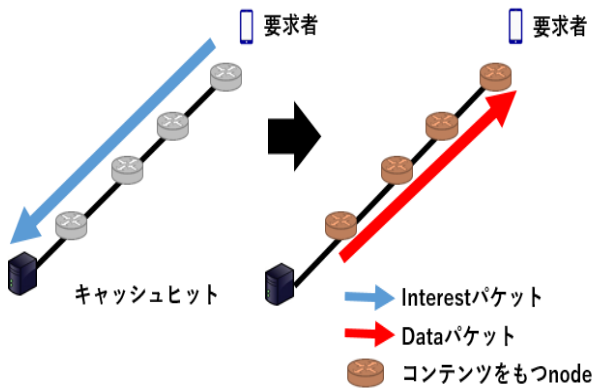


図2 LCE方式の例

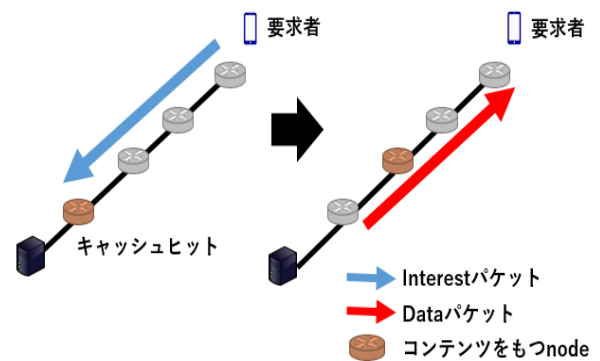


図4 MCD方式の例

### 3.2.2 Leave Copy Down(LCD)方式

LCD方式は、図3のようにInterestパケットの送信経路上のnodeまたは配信者に要求するコンテンツが存在する場合(キャッシュヒット)、Dataパケットの送信経路上の要求者にひとつ近いnodeだけがコンテンツをキャッシュする。コンテンツのコピーが複数の要求に対して、1ホップずつ末端へ近づけていき、キャッシュの分散速度は控えめである。

### 3.2.3 Move Copy Down (MCD)方式

MCD方式は、図4のように、Interestパケットの送信経路上のnodeに要求するコンテンツが存在する(キャッシュヒット)nodeがそのコンテンツをCSから削除し、要求者にひとつ近いnodeのCSへキャッシュする。これによりMCDでは要求者から配信者までの経路上においてコピーの数を低減することができる。

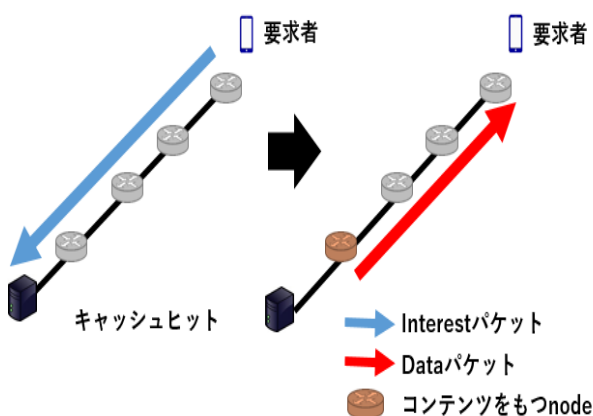


図3 LCD方式の例

### 3.2.4 Prob方式

Prob方式は、各nodeがDataパケットを受信すると、確率 $P[=0\sim 1]$ でキャッシュを行う。 $P=1$ のときはLCE方式と実質同じ方式となる。

### 3.2.5 既存キャッシュ配置方式の課題

- (1) 既存方式は、配信者から送信者までのパス上の各nodeが自律的にキャッシュ制御を行っており、非協力的であり、有限なキャッシュ空間を効率的に利用されていない可能性がある。
- (2) 既存方式は配信者の現在地が考慮されていない。nodeから配信者までのホップ数に関係なく同様なキャッシュ配置を行うため、効率をより向上する余地があると考えられる。

## 4. 提案方式

先行研究の課題を解決するための基本方針を4.1章で説明する。また4.2章と4.3章にそれぞれの方針に従った提案方式の仕組みを具体的に説明する。

### 4.1 基本方針

#### (1) 既存移動管理方式の課題の解決

各nodeをグループ化し、配信者がグループ内部と、外部を移動する際の処理を分ける。移動処理の二階層化により、配信者がグループ内部で移動するとき、グループ内のnodeの経路情報だけを変更し、配信者の経路更新オーバーヘッドを削減する。

#### (2) 既存キャッシュ配置方式の課題へ解決

同じグループ内にあるnode同士が互いのキャッシュ情報をInterestパケットを利用して共有する。各nodeがInterestパケットを受信する際に、自分のキャッシュ状況によりキャッシュをするかしないかを判断する。また、コンテンツをキャッシュする際に送信ルート上に記録を行い、Interestパケットを配信者だけではなく、グループ内にそのキャッ

シュがあると記録した方向にルーティングすることができるため、グループ内のキャッシュを有効に利用する。

また、移動配信者が存在するときに、図5で示すように、要求者がそれぞれ移動配信者 A と固定配信者 B,C が持つコンテンツを1回ずつ要求するとする。Node I に A,B,C のコンテンツをすでにキャッシュしているとき、該当 Data パケットが経由する node 数(ホップ数)がそれぞれ 1, 2, 4 ホップ数削減できるため、配信者 C のコンテンツをキャッシュする価値が一番高い。また、移動配信者 A が Node I から Node II に移動すると、A のコンテンツを Node I にキャッシュすれば、6 ホップのホップ数削減ができ、キャッシュ価値の順位の変更が生じる。

node において、あるコンテンツ C のキャッシュ価値と、受け取った C を要求する Interest パケットの受信数の積は、node にとって C の貢献度と定義する。

上述のような移動配信者の特性(node が配信者までの距離の変更)とコンテンツの要求数を考慮し、各 node がコンテンツをキャッシュすることによるコンテンツごとの貢献度を動的に計算し、貢献度が高いコンテンツからキャッシュを行う。

また、ネットワークに負担をかけないため、Interest パケット、Data パケットと移動管理方式で用いられるパケット(MR 要求と MR 応答)以外に独自のパケットを利用しない。

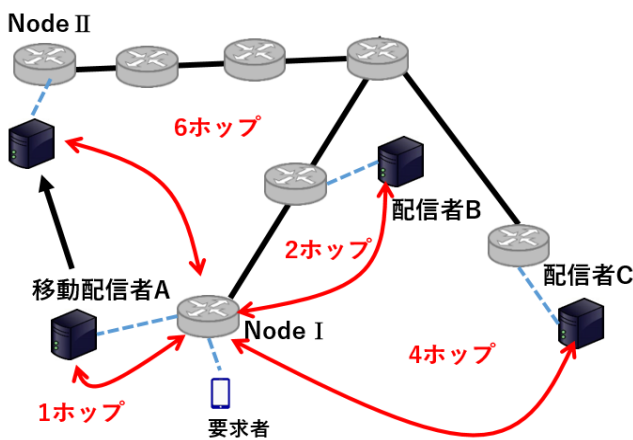


図5 コンテンツキャッシュ価値の計算例

#### 4.2 配信者の移動管理方式

node をグループ化し、グループ毎にグループと外部ネットワークの gateway として Head Node(HD)を設置する。グループ間の送受信は必ず HD を経由するようにネットワーク全体の node の FIB を設定する。配信者がグループ内を移動する際は、グループ内部の node の経路情報だけを変更し、Home node への MR 要求と MR 応答のオーバーヘッドを削減する。図6に経路管理の例を示す。

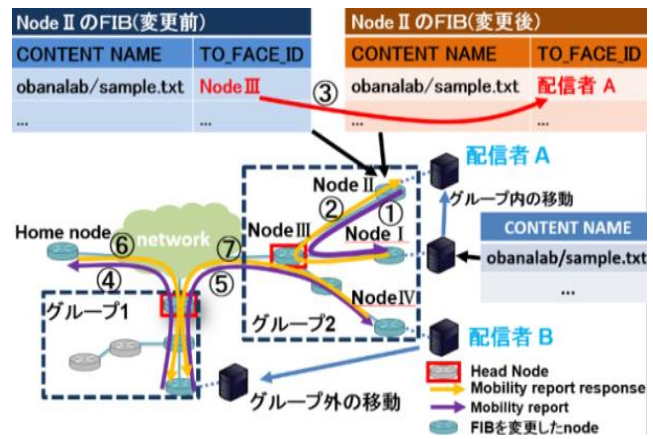


図6 経路管理の例

- (1) 配信者 A がグループ 2 内の Node I から Node II に移動すると、直前の Node I に MR 要求を送信し(①)、また Node I から MR 応答が返送(②)される途中の node では FIB を更新する(③)
- (2) 配信者 B がグループ 2 からグループ 1 に移動すると、それぞれ Home node、移動先グループの HD を経由して直前にいた Node IV に MR 要求を送信する(④⑤)。Home node と Node IV から MR 応答が返送される際(⑥⑦)、MR 応答を受信した全 node の FIB を更新する

#### 4.3 キャッシュ配置方式

提案方式では、有限なキャッシュ空間を有効に利用するために、node がコンテンツをキャッシュや削除する際に、Interest パケットに情報を入れて上流 node に報告し、またその情報を受け取った node は下流 node のキャッシュ状況に基づきルーティングテーブルを更新する。

また、各 node が Interest パケットを受信する際に、コンテンツを保つことにより、ネットワークへの貢献度を計算/更新する。従来方式のようにどのコンテンツでも同じ方式でキャッシュするのではなく、貢献度が高いコンテンツのみキャッシュすることを自律的に決定し、またキャッシュしようとするコンテンツ名と、削除しようとするコンテンツ名(CS 内貢献度が一番小さいコンテンツ)を Interest パケットに入れて、ほかの node に通知する。貢献度の計算と更新は節 4.3.2 で説明する。

##### 4.3.1 グループ内協力

提案方式では、各 node はグループ内 node 同士が持つコンテンツの情報を把握するために、FIB 以外にグループ内部ルーティングテーブル M を設ける。node が Interest パケットを受信する際に、先に M を確認し、グループ内部にキャッシュが存在するときに Interest パケットを M に記録した方向にルーティングすることにより、グループ内部で協力的なキャッシュを行う。M にコンテンツの記述がなければ FIB を利用して Interest パケットを配信者向けに中継する。

図7はグループ内部ルーティングテーブル M の例を示す。図7の①は M の更新例を示す。node  $N_1$  が要求者からコンテンツ  $C_3$  を要求する Interest パケットを受信し、 $C_3$  の貢献度  $Z_{C_3}$  が  $C_2$  の貢献度  $Z_{C_2}$  より高いと、キャッシュ空間が足りないため、 $C_2$  を削除して  $C_3$  をキャッシュすることを判断し、その旨を Interest パケットに入れ、node  $N_2$  に送信する。

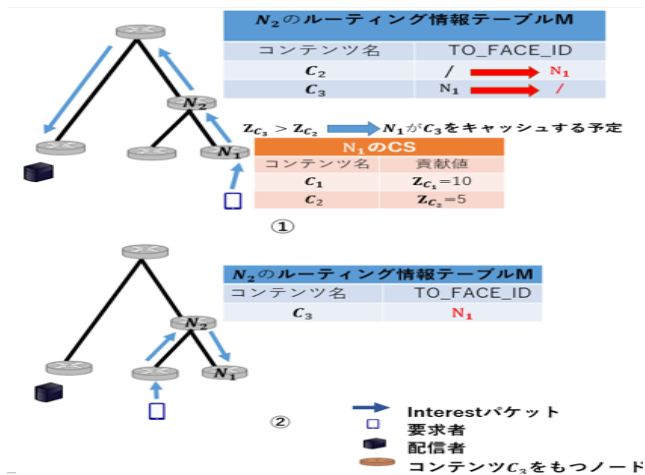


図7 グループ内部ルーティングテーブル M の例

node  $N_2$  が Interest パケットに含まれている情報により、ルーティングテーブル M の更新を行い、図7の②で示すように、次から node  $N_2$  は  $C_3$  を要求する Interest パケットをキャッシュがあると記録した方向 (node  $N_1$ ) にルーティングする。

### 4.3.2 貢献度の計算

グループ内の各 node は、コンテンツ C の Interest パケットを受信するたびに、コンテンツ C の貢献度 ( $Z_c$ ) を更新する。

また各 node は配信者 S までの距離 (ホップ数)  $X_S$  を貢献度の計算に用いる、配信者が移動する際の更新仕組みは節 4.2.4 で説明する。

$Z_c$  の計算手順は図8のようにになる。

- ① Interest パケットが配信者まで送信された場合、ルート上の各 node がコンテンツ C をキャッシュすることにより、また同じ要求者からコンテンツ C が要求される際に、配信者までのホップ数  $X_S$  のホップ数節約ができるため、貢献度  $Z_c$  が  $X_S$  だけ増やす。
- ② 要求者から配信者までのパス上キャッシュヒットした場合、①と同じように、各 node がコンテンツ C 取得の貢献度  $Z_c$  が配信者までのホップ数  $X_S$  だけ増やす。
- ③ Interest パケットが配信者までのパスの途中で node N ルーティング情報テーブル M の情報により他ルータにルーティングされたら、Interest パケットを受信した、N から x ホップだけ離れている各 node は、コンテンツ C 取得の貢献度  $Z_c$  は、 $\{(N \text{ の } X_S) - x\}$  だけ増やす。

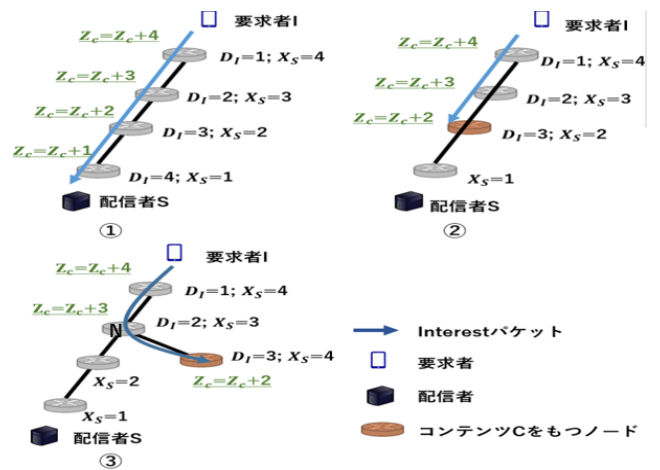


図8 貢献度の計算

### 4.3.3 貢献度のアップデート

より正確的にグループ内部のキャッシュ状況に対応するために貢献度のアップデートを行い、アップデートはリアルタイムで行われる部分と、定期的に行われる部分に分ける。

#### リアルタイム部分:

図9はアップデートのリアルタイム部分の例を示す。

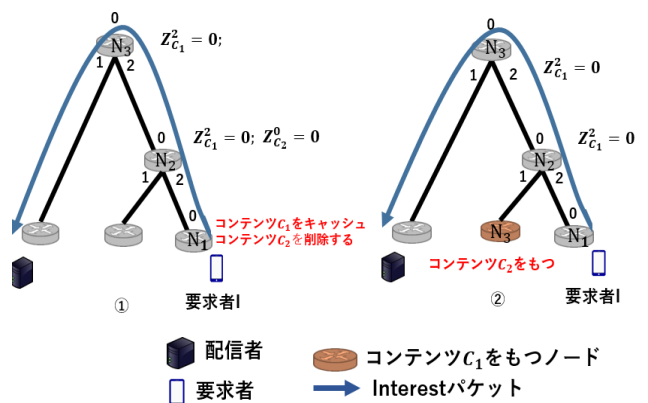


図9 貢献度のアップデート

- ① node  $N_1$  がコンテンツ  $C_1$  を要求する Interest パケットを受信し、貢献度の比較を行い、 $C_1$  をキャッシュし、 $C_2$  を削除することを決め、Interest パケットにその旨を入れる。node  $N_2$  と  $N_3$  が下のレベルからその Interest パケットを受け取る時に、下のレベルの node 集団がコンテンツ  $C_1$  を保つ予定なので、その方向 (インターフェス 2) からコンテンツ  $C_1$  の Interest パケットが受信なくなると予測するため  $Z_{C_1}^2$  を 0 とする。また、下のレベルの node 集団にコンテンツ  $C_2$  がなくなり、つまり 0 番以外のインターフェスで、 $C_2$  へのルーティング情報がなければ  $N_2$  に上のレベルから (インターフェス 0) コンテンツ  $C_2$  の Interest パケットが受信なくなると予測するため  $Z_{C_2}^0$  を 0 とする。

- ② ①の特殊状況として、 $N_2$ が Interest パケットを受け取ったときに、インターフェース 1 にコンテンツ  $C_2$  のルーティング記録が存在する際に、上のレベルからコンテンツ  $C_2$  の Interest パケットが受信する可能性があるので、 $Z_{C_2}^0$  を変更しない。

**定期的部分：**

配信者の移動により、配信者までの距離が変更される。リアルタイムで行うアップデートは、削除/キャッシュがなければ行われなため、その影響を受けないコンテンツに対する各 node が持つ貢献度情報も更新する必要がある。その問題を解決するために Timewindow を設置する。Timewindow の時間間隔  $T$  を経たら、node が各コンテンツに対する貢献度  $Z$  を貢献度更新係数  $R$  (定数、本稿では  $R = 0.7$  とする) にかけて、 $Z = Z * R$  とする。

**4.3.4 移動配信者までの距離の更新**

配信者が移動するたびに、各 node から配信者までの距離 (ホップ数) を更新する必要がある。

図 10 のように、配信者が移動するたびに、MR 要求を受信した node が配信者までの距離を更新する。また、MR 要求が経路しない node は、該当移動配信者のコンテンツが含まれる Data パケットを受信した際に、自身が持つ情報と Data パケットに含まれる情報と比べ、最新の距離情報に更新する。

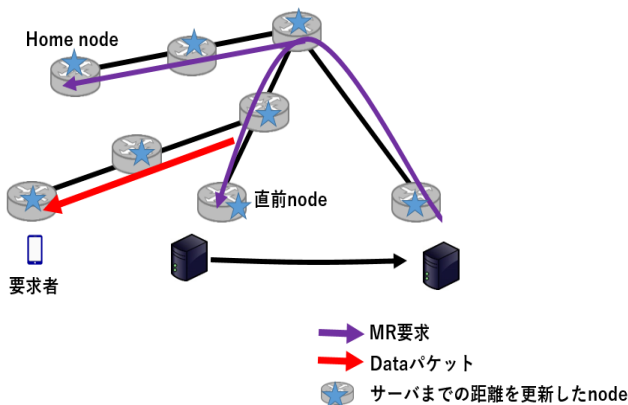


図 10 移動配信者までの距離更新

**5. シミュレーション評価**

**5.1 概要**

ネットワークシミュレータ Qualnet[10]上に、移動管理方式である PMC 方式と、キャッシュ配置方式の LCE, LCD, MCD, Prop 方式と提案方式を実装し評価した。node 間は TCP/IP で接続した。ネットワークトポロジーを図 11 に示す。配信者と要求者が混在するグループを 3 つ設置し、移動配信者は配信者グループ内か、別のグループに移動することができる。シミュレーション条件を表 1 に示す。

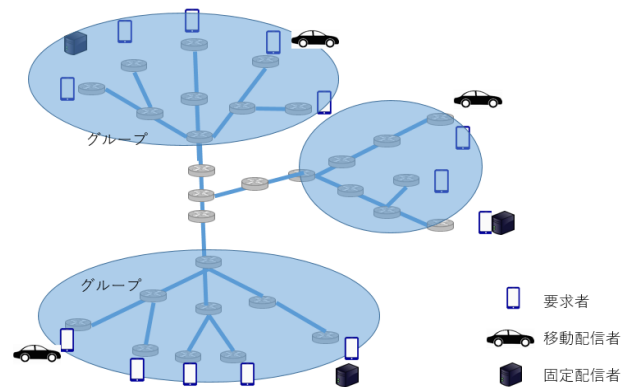


図 11 ネットワークトポロジー

シミュレーションではコンテンツの人気度を「Zipf の法則」を適用し、移動による影響を評価するために、配信者が人気度上位のコンテンツを持って移動するとする。

評価項目を以下に示す。

- 1) 配信者の移動により各キャッシュ配置方式への影響 (全サーバ固定より移動状況下平均ホップ数と平均キャッシュヒット率の劣化)
- 2) 配信者移動に伴う FIB 変更の通信オーバーヘッド (MR 要求と MR 応答が経路する node 数)。
- 3) コンテンツ取得で Data packet が経路する node 数 (平均ホップ数)。

表 1 シミュレーション条件

CCN node 数	31
要求者数	60 台
配信者数	6 台
グループ外の移動確率 p	0,30,50,70,100%
コンテンツ数	5000 個 (Zip 法則より)
node のキャッシュ容量	グループでコンテンツ総数の 1,2% (node ごと 5,10 個)
グループ数	3
要求頻度	ランダム (1~20 秒ごと)
要求総回数	100000 回
移動配信者の移動頻度	700 秒ごとに
配信者移動総回数	100 回
TimeWindow 時間間隔 T	3000 秒
シミュレーション実行回数	10 回

**5.2 結果**

**5.2.1 配信者の移動管理方式**

図 14 に、配信者の移動管理をするための通信オーバーヘッドを示す。提案手法で移動配信者がグループ内を移動す

る場合は、home node への MR の送信が不要となるため、PMC 方式より通信オーバーヘッドを最大 48%削減できている。グループ内での移動の比率が高いほど、提案方式の効果は大きい。

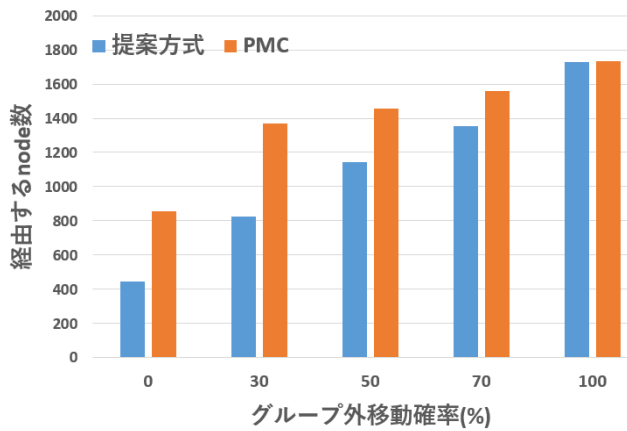


図 12 配信者移動時の FIB 変更の通信オーバーヘッド

## 5.2.2 キャッシュ配置方式

### 5.2.2.1 移動による影響

配信者の移動により、各キャッシュ配置方式への影響を評価した (Prob 方式のキャッシュ確立 P は 0.3 および 0.7 とする)。図 12 と図 13 に、配信者がグループ外への移動確率が 70% のとき、コンテンツ配信の平均ホップ数と平均キャッシュヒット率の劣化 (比率で表す) を示す。

図で示すように、提案方式は、コンテンツまでの距離を考慮することにより、配信者の移動する場合であっても、平均ホップ数への影響を抑えられている。移動回数が 840 回のときに、従来方式の LCE, LCD, MCD, Prob(0.3), Prob(0.7)方式の全配信者固定環境の平均ホップ数より、それぞれ 1.4%, 1.5%, 2.8%, 1.3%, 1.6%劣化する。提案方式の劣化が 1.0%となり、各提案方式よりそれぞれ 22.5%, 28.0%, 62%, 19.8%, 32.4%減少している。

また、提案方式では配信者からの距離が遠ければ遠いほど、配信者が持つコンテンツをキャッシュする価値が高いと判断する。移動配信者が移動する度に、Timewindow の更新期間内に、直前 node 周辺だけではなく、配信者の移動先 node 周辺の node も移動配信者が持つコンテンツの価値が高いと判断するので優先的にキャッシュを行い、配信者が移動するとき、キャッシュヒット率が逆に高くなる。

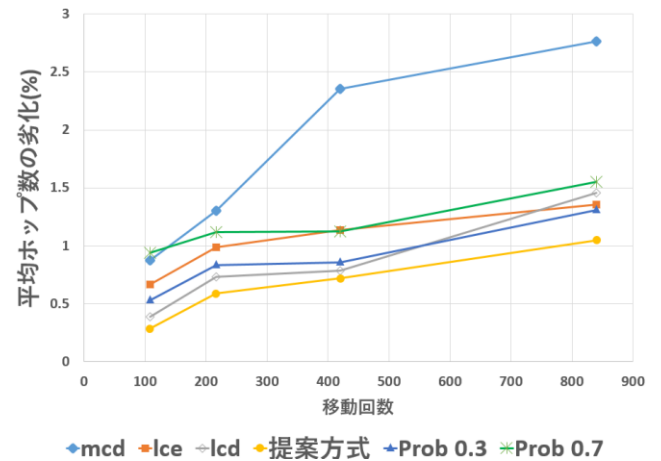


図 13 移動による平均ホップ数の劣化

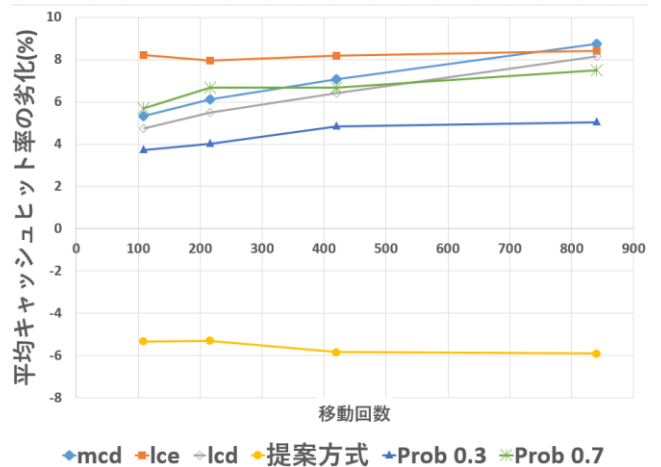


図 14 移動による平均キャッシュヒット率の劣化

### 5.2.2.2 平均ホップ数

図 15 と図 16 に、node のキャッシュ容量が 5 のとき、図 17 と図 18 に、node のキャッシュ容量が 10 のとき、配信者がグループ外への移動確率がそれぞれ 30% と 70% のときコンテンツ取得の平均ホップ数を示す。Prob 方式のキャッシュ確立 P は 0.3, 0.7 でそれぞれ実験を行った。

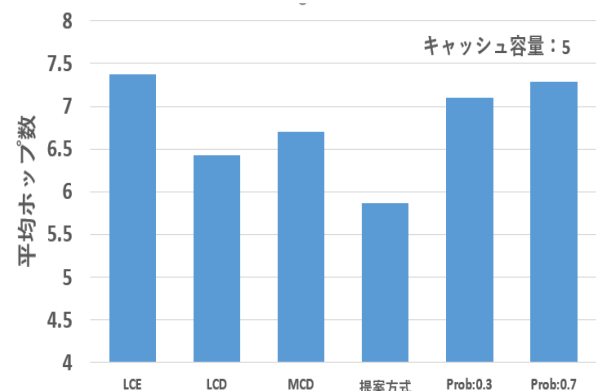


図 15 グループ外移動確率 30%(キャッシュ容量 5)

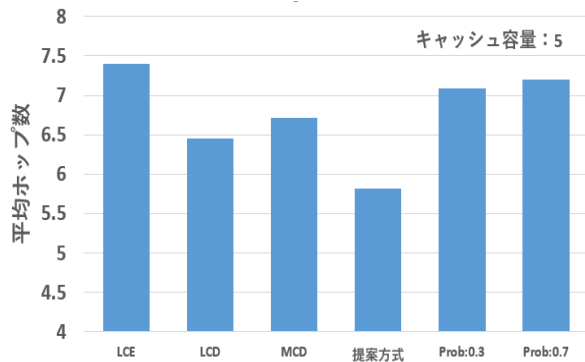


図 16 グループ外移動確率 70%(キャッシュ容量 5)

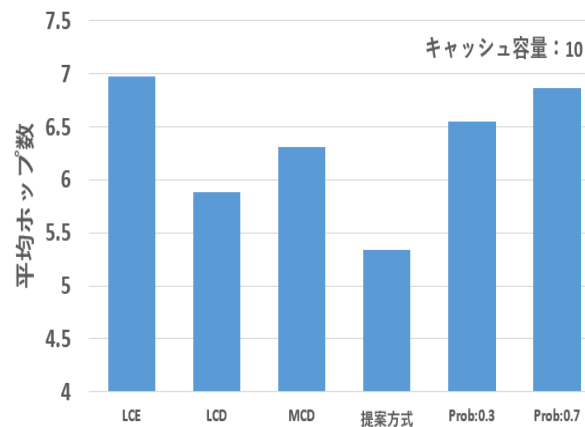


図 17 グループ外移動確率 30%(キャッシュ容量 10)

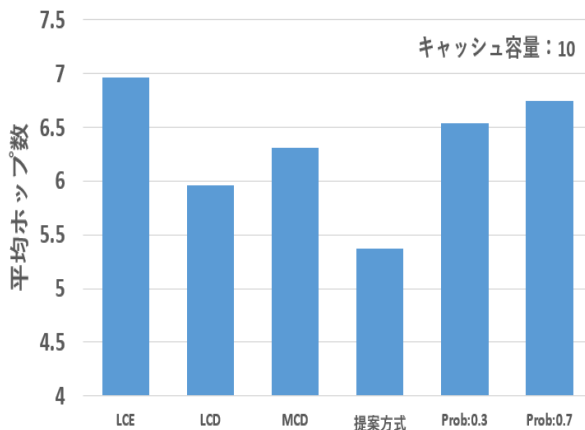


図 18 グループ外移動確率 70%(キャッシュ容量 10)

キャッシュ容量が 5 のとき(グループ単位で約総コンテンツの 1%), 提案方式の平均ホップ数が LCD 方式, MCD 方式, Prob(0.3)方式, Prob(0.7)方式と LCE 方式よりそれぞれ最大約 9.8%, 13.3%, 17.8%, 22.2%, 19.4%削減される。

キャッシュ容量が 10 のとき(グループ単位で約総コンテンツの 2%), 提案方式の平均ホップ数が LCD 方式, MCD 方式, Prob(0.3)方式, Prob(0.7)方式と LCE 方式より最大それぞれ約 9.9%, 15.4%, 18.4%, 22.2%, 23.5%削減される。

以上の結果により, 提案方式はいろんな条件でキャッシュ空間の圧迫を低減できることがわかった。

## 6. おわりに

CCN におけるコンテンツ配信者が移動する環境における効果的な移動管理とキャッシュ配置の方式を提案し, シミュレーションによりその有効性を検証した. node のグループ化による階層的な経路情報管理により, 配信者の移動により生じた通信オーバーヘッドを最大 48%削減ができた。

また, 各 node は移動配信者までの距離変化を常に更新し, 配信者までの距離と要求される回数に基づいてコンテンツごとのキャッシュ貢献度を計算してキャッシュを置くか否かを決定し, またグループ内の node 間で協力することにより, 移動による影響を従来方式より最大 62%, 平均ホップ数を最大 23.5%減少させた。

今後は, さまざまなネットワークトポロジーでの評価, ならびにより効果的な貢献度の算出方法の検討等を行う予定である。

## 参考文献

- [1] “Cisco Visual Networking Index : 予測と方法論, 2016~2021 年”, [https://www.cisco.com/c/ja\\_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360](https://www.cisco.com/c/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360). (参照 2016-02-20).
- [2] 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 ACM international conference on Emerging networking experiments and technologies, pp. 1-12, 2009.
- [3] D Han, M Lee, K Cho, T Kwon, and Y Choi, “Publisher mobility support in content centric networks,” in Proc. IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN), pp. 214-219, 2014.
- [4] C. Fang, H. Yao, Z. Wang, W. Wu, X. Jin, and F. R. Yu, “A survey of mobile information-centric networking: Research issues and challenges,” Commun. Surveys Tuts., vol. 20, no. 3, pp. 2353–2371, Feb. 2018.
- [5] M. Zhang, H. Luo, and H. Zhang, “A Survey of Caching Mechanisms in Information-Centric Networking,” IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 17, pp. 1473-99, 2015.
- [6] H. Farahat and H. Hassanein, “Optimal caching for producer mobility support in named data networks,” in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), pp. 1-6, May 2016.
- [7] Y. Li, T. Lin, H. Tang, and P. Sun, “A chunk caching location and searching scheme in content centric networking,” in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Ottawa, ON, Canada, 2012, pp. 2655–2659.
- [8] N. Laoutaris, H. Che, and I. Stavrakakis, “The LCD interconnection of LRU caches and its analysis,” Performance Evaluation, vol. 63, no. 7, 609–634, 2006.
- [9] I. Psaras, W. K. Chai, and G. Pavlou, “Probabilistic in-network caching for information-centric networks,” in Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop ICN, 2012, pp. 55–60.
- [10] QualNet Network Simulator Software, <https://web.scalable-networks.com/qualnet-network-simulator-software>