

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	伴 大心	学籍番号	1352024
論文題目	ネットワーク符号化機能を有するキャッシュを用いたコンテンツ配信法		
要旨	<p>コンテンツそのものに重点を置き、コンテンツ配信の効率化を目的としたネットワークアーキテクチャとして、コンテンツセントリックネットワーク (CCN) が提案されている。CCN においては、コンテンツに固有の識別子を持たせてメッセージのルーチングを行い、CCN を構成するルータ装置は、要求があったコンテンツをキャッシングして、それを再利用することで効率的なコンテンツ配信を実現する。しかしながら、各ルータ装置が持つキャッシュ容量には限界があり、キャッシュヒット率が低下して、コンテンツ配信が十分に効率化されないという問題がある。本研究では、ルータ装置のキャッシュ機能にネットワーク符号化技術を適用することにより、コンテンツ配信の効率性を改善するための方法を提案する。</p> <p>同一ユーザが取得要求する可能性が高い、互いに内容が近いコンテンツを保持する 2 つのサーバが離れて存在すると仮定する。この場合、両サーバの間にキャッシュが存在すれば、各サーバに近いユーザは、近いサーバが持つコンテンツに加えて、遠隔のサーバが持つコンテンツも取得できる。しかも、2 つのコンテンツから生成されるネットワーク符号化コンテンツをキャッシングすることで、1 コンテンツ分のキャッシュ容量を用いて、各サーバに近い両ユーザが、それぞれネットワーク符号化コンテンツをダウンロードして復号化することにより、遠隔のサーバが持つコンテンツを取得できる。CCN において、コンテンツ識別子は、コンテンツ内容に従って階層的に与えられるため、識別子のプレフィックスが互いに一致するコンテンツ同士をネットワーク符号化してキャッシングすれば良い。</p> <p>計算機シミュレーションを行って、提案コンテンツ配信法の評価を行った。評価の結果、ネットワーク符号化を使用した場合の方が、各ユーザが取得できるコンテンツ数が増加することが判明した。また、接続リンク数が多いノードにキャッシュを配備すると有効であることが判明した。ネットワーク全体のキャッシュ容量が制限されている場合、全体のノード数が 100 であるネットワークでは、キャッシュノードの数を 10 に設定した時が最も有利である。評価結果より、CCN のルータキャッシュにネットワーク符号化機能を付与する提案コンテンツ配信法によって、高効率なコンテンツ配信が実現可能となる。</p>		

平成26年度修士論文

【ネットワーク符号化機能を有するキャッシュを用いたコンテンツ配信法】

電気通信大学大学院情報システム学研究科

情報ネットワークシステム学専攻

学 籍 番 号 : 1352024

氏 名 : 伴 大心

主任指導教員 : 荻野 長生 客員教授

指 導 教 員 : 吉永 努 教授

指 導 教 員 : 入江 英嗣 准教授

提出年月日 : 平成27年2月13日 (金)

目次

1. 序論.....	2
2. 関連研究.....	3
2.1 コンテンツセントリックネットワーク(CCN).....	3
2.2 ネットワーク符号化技術.....	5
3. 提案コンテンツ配信法.....	6
3.1 提案コンテンツ配信法の原理.....	6
3.2 キャッシュアルゴリズム.....	9
3.3 ネットワーク符号化アルゴリズム.....	10
3.4 コンテンツ配信時の処理手順.....	12
4. 提案コンテンツ配信法の評価.....	14
4.1 評価対象ネットワーク.....	14
4.2 シミュレーション内容.....	14
4.3 評価方法.....	16
4.4 評価結果.....	18
4.4.1 10000 検索での所持コンテンツ数の変位.....	18
4.4.2 キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化.....	21
4.4.3 コンテンツ要求範囲, 符号化範囲を狭めた際の 収集コンテンツ数変化.....	22
4.4.4 コンテンツ要求範囲, 符号化範囲を広げた際の 収集コンテンツ数変化.....	23
4.4.5 キャッシュする際にホップ数制限をかけた際の 収集コンテンツ数変化.....	24
4.4.6 キャッシュ容量が半分の際の収集コンテンツ数変化.....	25
4.4.7 キャッシュ容量が倍の際の収集コンテンツ数変化.....	26
4.4.8 ネットワークリンク数を増やした際の 収集コンテンツ数変化.....	27
4.4.9 ランダムにキャッシュノードを決定した際の 収集コンテンツ数変化.....	28
4.5 考察.....	29
5. 結論.....	32
6. 課題と今後の展望.....	32
参考文献.....	33
謝辞.....	34

1. 序論

インターネットにおける通信量は、携帯電話やスマートフォンなどの個人向けデバイスの増加やM2M(Machine to Machine)接続数の増加などにより、年々増大の一途をたどっている[1][2].

また、やりとりされるデータの内訳では、より多くの情報量を必要とする高解像度・高フレームレートの映像コンテンツデータが急増しており、今後も通信需要は伸び続けると予測される.

しかしながら、通信を担うケーブルや電波などの通信帯域は限られており、また、一つのサーバにアクセスが集中すると遅延が発生し、アクセス品質の低下を招く可能性が増加する. 更に、サーバ本体やサーバ付近でのリンクやルータ装置に故障が発生した場合、サーバへのアクセスが不能になる危険性も存在し、尚且つ、通信経路が限られることによって、データの盗聴の可能性も高くなる.

よって、今後は、通信トラフィック負荷が一部の通信リソースやサーバに集中しないコンテンツ配信法が必要となる.

上記の課題を解決するコンテンツ配信法を実現するために、コンテンツセントリックネットワーク(CCN)と呼ばれるネットワークアーキテクチャが提案されている[3]. 従来の通信形態では、例えばコンテンツ配信の場合、コンテンツ検索によって得られた所望のコンテンツを保有するホストのIPアドレス等、通信相手の識別子に対してコンテンツ配信要求を送出する. しかし、CCNでは、コンテンツそのものに重点を置いて、コンテンツに固有の識別子を持たせ、本識別子に対してコンテンツ配信要求を送出する. また、CCNを構成するルータ装置は、要求があったコンテンツをキャッシングして、それを再利用することで、効率的なコンテンツ配信を実現する. しかしながら、ルータ装置が有するコンテンツキャッシュの容量には制約があるため、コンテンツ配信要求のキャッシュヒット率が低下して、所望のコンテンツ配信を得られない、依然としてサーバに負荷が集中する等の問題がある.

そこで、本研究では、CCNにおいて、ネットワーク符号化技術[9]を適用することにより、効率的なコンテンツ配信を実現するための方法を提案し、計算機シミュレーションを行って、その有効性を検証する. 提案コンテンツ配信法では、CCNにおけるコンテンツ識別子が、コンテンツ内容を反映して階層的に付与されることを利用して、互いに内容が類似した複数コンテンツをネットワーク符号化してキャッシングすることにより、コンテンツ配信要求のキャッシュヒット率を向上させる.

以下、第2章では関連研究の説明を行い、第3章では提案するコンテンツ配信法に関する説明を行う. 第4章では、提案するコンテンツ配信法の性能評価を行い、提案法の有効性を示す. 第5章では、本研究の結論を述べる.

2. 関連研究

本章では、提案コンテンツ配信法に関連する既存研究について説明する。

2.1 コンテンツセントリックネットワーク(CCN)

膨大なデータの配信・取得を容易かつ効率的に実現するための技術として、ICN(Information-centric Networking)と呼ばれるデータ指向ネットワークに関する幾つかの研究プロジェクトが進められている。これは、名前を表す ID と場所を表すアドレスを明確に分離するアーキテクチャである。本アーキテクチャでは、名前解決サーバにデータ名を表す ID とそのアドレスが登録され、ユーザは、名前解決サーバに対して所望のデータを表す ID によって問合せを行い、返答としてデータのアドレスを得て、ネットワークからデータを取得する。

コンテンツセントリックネットワーク(CCN)は、データセントリックネットワークの1つの実装例であり、特にコンテンツ取得を目的としたネットワークアーキテクチャである。現状のインターネットの利用形態が、コンテンツ指向であるのかかわらず、ネットワークアーキテクチャはホスト指向であり、ネットワーク構成と利用実態が剥離している。そこで、増大するコンテンツを効率良く扱うための仕組みとして、研究が進められている[3-8]。

現在のインターネット形態でコンテンツを取得するためには、コンテンツを所持しているホストを探し、ホストのアドレスを使ってアクセスを行わなければならないが、CCN では、コンテンツそれぞれに固有の識別子を持たせてあるので、欲しいコンテンツの識別子に基づくコンテンツ要求メッセージを送出するだけで、最も近いコンテンツ所持ノードからコンテンツを得ることが可能である。

CCN ではネットワークを構成するコンテンツルータ装置にキャッシュ機能が備えられ、コンテンツルータ装置を経由して転送されたコンテンツを保存しておくことにより、次のコンテンツ要求に対して、そのコンテンツルータ装置のコンテンツキャッシュからコンテンツ配信を行うことが可能である。最も近いコンテンツルータ装置からコンテンツを得ることができるので、コンテンツ要求に対する応答時間を短縮し、コンテンツ転送ホップ数の減少によって、ネットワークへの負荷を低減できる。また、コンテンツサーバへのアクセス集中が避けられ、耐障害性も向上する。

CCN におけるコンテンツ ID は、従来の IP アドレスと同様、階層的に指定される。CCN において、交換されるメッセージは、コンテンツ要求を表す Interest メッセージとコンテンツを転送する Data メッセージの 2 種類であり、ネットワークを構成する各コンテンツルータ装置は 3 種類のテーブルを持つ。Interest メッセージのルーティングテーブルである FIB (Forwarding Information Base) は、コンテンツ ID をエントリに持ち、予め広告される OSPF 等のルーティングプロトコルメッセージの受信時に設定される。PIT (Pending Information Base) は、Interest メッセージの受

信時に設定され、Interest 到着方向を示し、これを逆に辿ることで Data メッセージがユーザへ正しく誘導される。CS (Content store) は、コンテンツ ID をエントリに持つコンテンツキャッシュである。各コンテンツルータ装置は、到着した Interest メッセージが要求するコンテンツがキャッシュ中に存在する場合は、Interest メッセージの転送を中止して、自装置から Data メッセージを返信する。

図 1 を用いて、コンテンツが配信される概要を説明する。まず、コンテンツサーバが、ルーティングプロトコルを使ってコンテンツ ID を広告 (①) し、各コンテンツルータ装置でコンテンツ ID によるルーティングテーブル(FIB)を設定する。そして、ユーザ端末がコンテンツ ID を指定して Interest メッセージを送信②した時、Interest メッセージは FIB を辿ってコンテンツサーバまで到達する。各コンテンツルータ装置は、Interest メッセージを転送する際、PIB を設定する。コンテンツを転送する Data メッセージは、PIB に従って元の経路を辿ってユーザ端末に返信③される。Interest メッセージや Data メッセージは、コンテンツ ID の最大プレフィックスマッチングに基づき転送される。Data メッセージが返信される経路上のコンテンツルータ装置においては、予め決められたポリシーに従って、コンテンツが CS 中にキャッシングされる。新たにコンテンツをキャッシングしたコンテンツルータ装置が、コンテンツサーバと同様に、ルーティングプロトコルを使ってコンテンツ ID を広告する場合も考えられる。

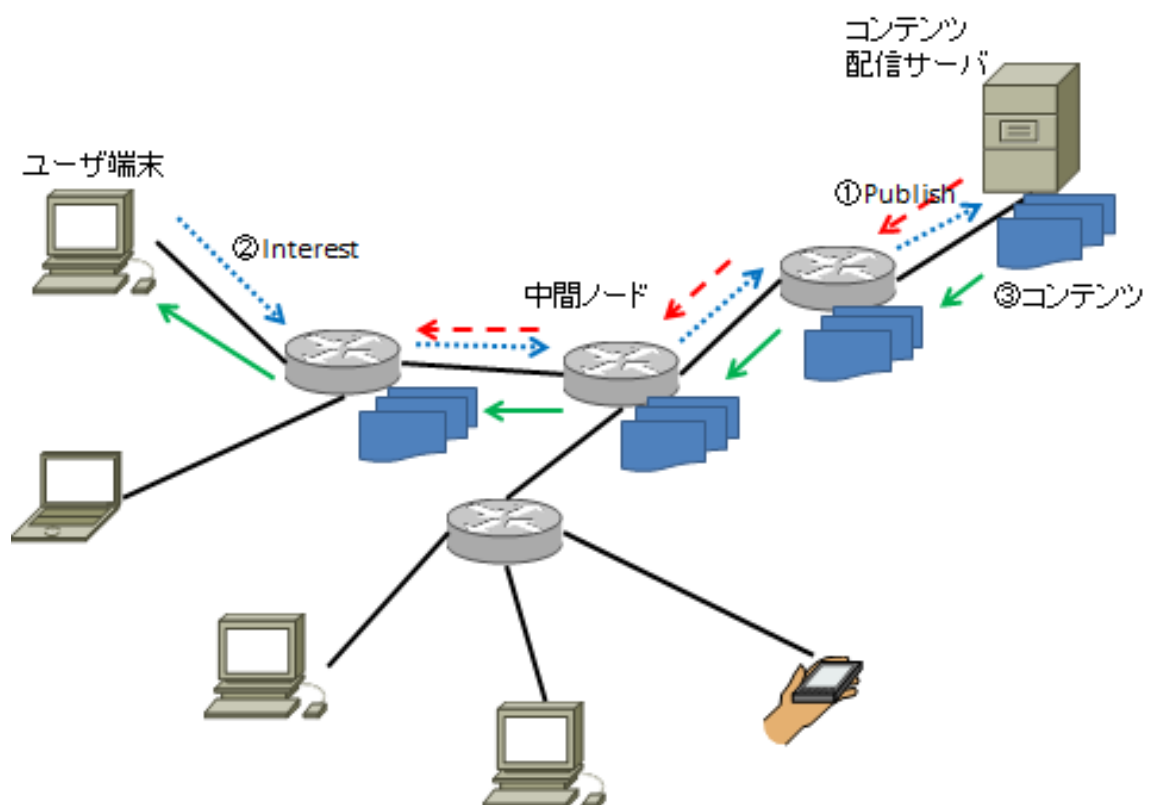


図 1. CCN におけるコンテンツ配信

2.2 ネットワーク符号化技術

複数のコンテンツを効率的にマルチキャスト配信することを目的として、ネットワーク符号化技術が提案されている [9]. ネットワーク符号化では、ネットワーク内の中継ノードにおいて配信先が異なる複数のコンテンツを1つのコンテンツに符号化することにより、通信帯域の有効利用を図る.

ネットワーク符号化技術とはマルチキャストにおいて複数受信ノードへの最大フローを実現するための手法であり、各送受信ノード対に対し、複数経路を使用する. 経路が重なった部分で符号化の演算を行い、同時に送信を行うことが可能となる[10].

図 2. では受信者がそれぞれコンテンツ A,B を求めている. 各受信者は, A,B の一方は, そのまま受け取ることが可能であるが, もう一方のコンテンツは中央のルータで経路が交差しており, ルータは同時に別のコンテンツを配信することができない. そこで, 2 つのコンテンツの符号化を行うことで, 同時の配信を可能とし, 受信者は符号化されたコンテンツを入手した一方のコンテンツで複合化することによって, A,B2 つのコンテンツを得ることができる.

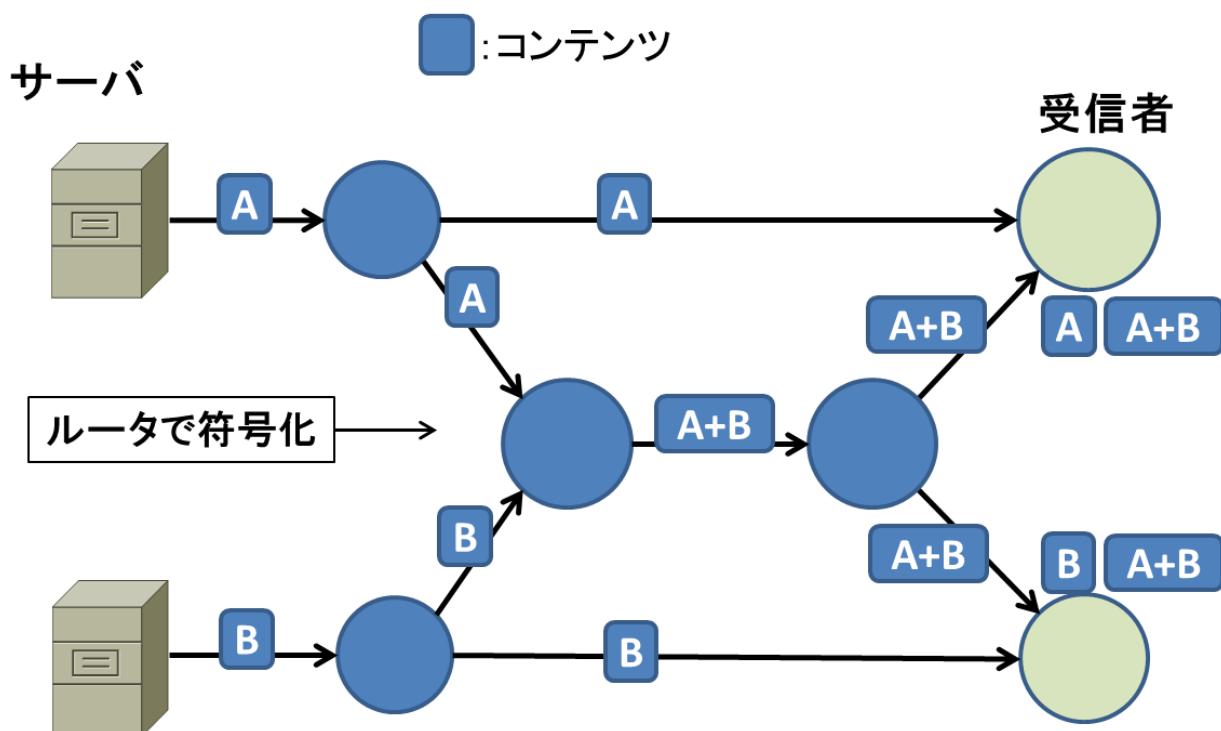


図 2. ネットワーク符号化を用いたコンテンツ配信

3. 提案コンテンツ配信法

3.1 提案コンテンツ配信法の原理

提案するコンテンツ配信法の原理について述べる。

図 3, 4 に示すように、保持するサーバが別々に存在するコンテンツ A と B の配信について考える。コンテンツ A と B に強い関連性があり、コンテンツ A を取得したユーザは高い確率でコンテンツ B も取得し、また逆に、コンテンツ B を取得したユーザは高い確率でコンテンツ A も取得すると仮定する。この時、片方のサーバに近いユーザは、遠くのもう片方のサーバにアクセスする必要があるため、両サーバの間にキャッシュが存在すると、アクセスに必要なホップ数が少なくなり、有効であると考えられる。

コンテンツセントリックネットワーク (CCN) において、所持コンテンツの Publish とコンテンツ要求の送付を、ネットワーク全体に行うことは現実的でない。そこで、ユーザがコンテンツを取得できる範囲については、ホップ数制限があると考えられる。図 3, 4 では、コンテンツを取得する際のホップ数は 2 以下であると想定している。また、中間ノードのキャッシュ容量は、1 コンテンツ分のみとする。ネットワーク符号化を使用しない場合 (図 3)、中間ユーザのコンテンツ要求によって、コンテンツ A, B 共にダウンロードが行われたとすると、中間ノードのキャッシュでは、後からダウンロードされたコンテンツ B が、先にダウンロードされたコンテンツ A に代わってキャッシングされる。その後、他の 2 ユーザから同様にコンテンツ A, B の要求が行われた場合、一方のユーザは、近くのサーバと中間ノードのキャッシュから 2 つのコンテンツ A, B を取得できるが、もう一方のユーザは、近くのサーバからコンテンツ B を取得できるのみである。

両サーバの間ではコンテンツ A と B の両方が転送されるため、コンテンツ A と B 両方のキャッシュ需要が存在する。各ユーザは、近くのサーバから片方のデータを容易に取得できるので、中間に存在するルータ装置に、コンテンツ A と B から生成されるネットワーク符号化コンテンツ A+B をキャッシングすることで、キャッシュ容量を有効に使用でき、両方のユーザがコンテンツ A, B を取得できる (図 4)。このように、ネットワーク符号化機能を有するキャッシュを配備して、互いに関連が強い複数コンテンツをネットワーク符号化することで、キャッシュ利用効率の良いコンテンツ配信を実現できると考えられる。CCN は、階層型のコンテンツ ID を想定して居り、コンテンツ ID のプレフィックスを比較することにより、コンテンツ間の関連性を知ることができる。

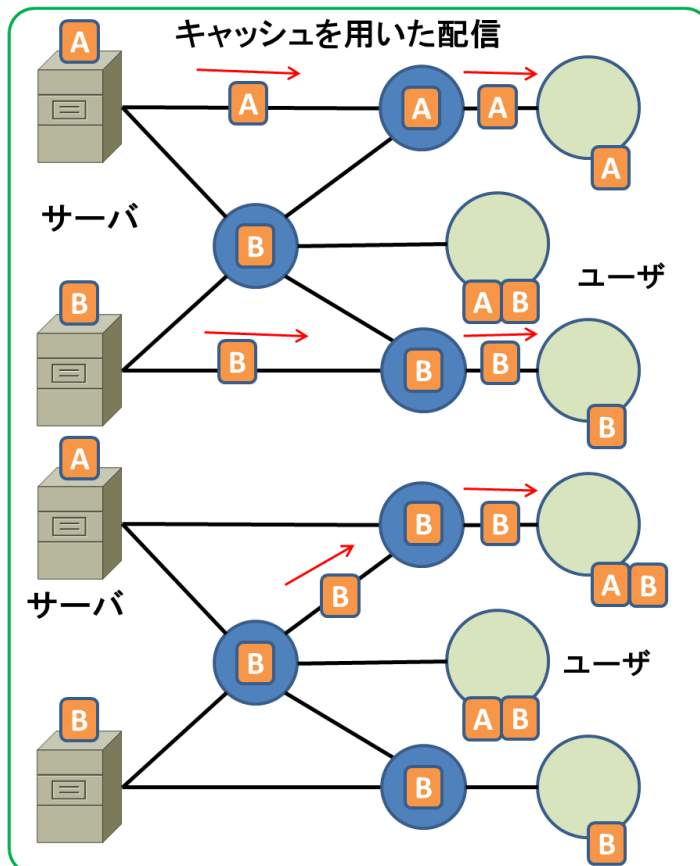
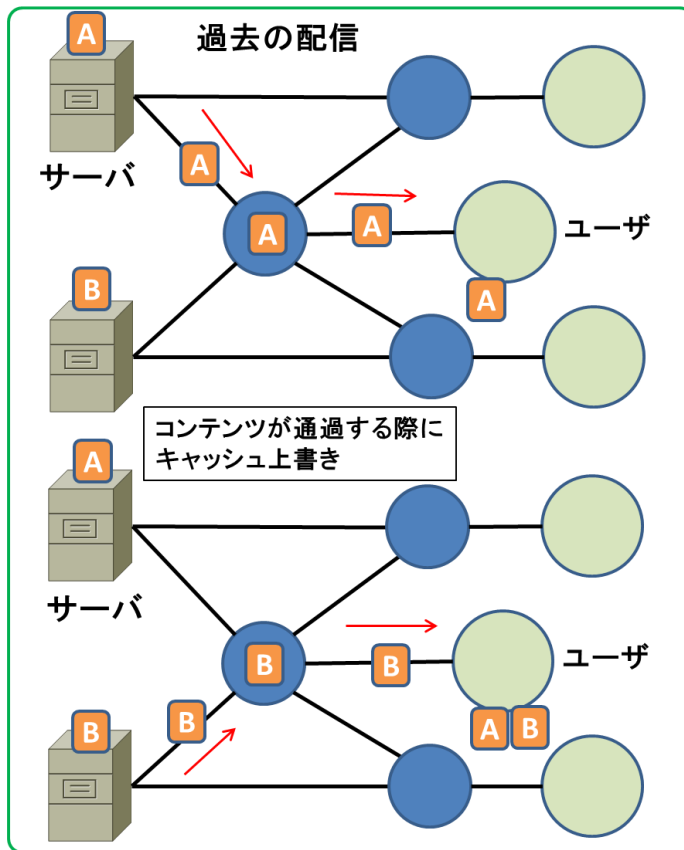


図 3. ネットワーク符号化を使用しない配信

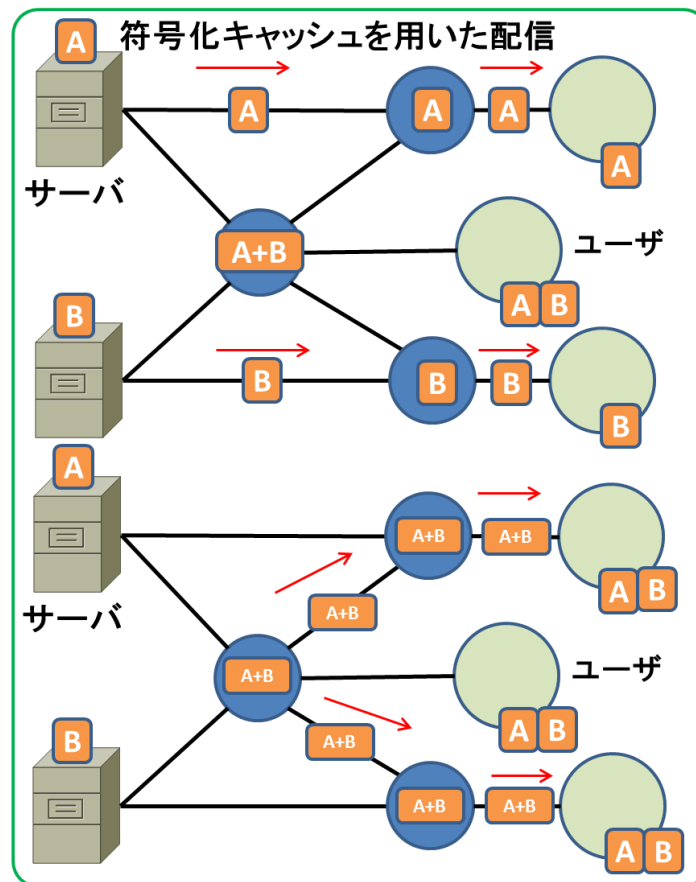
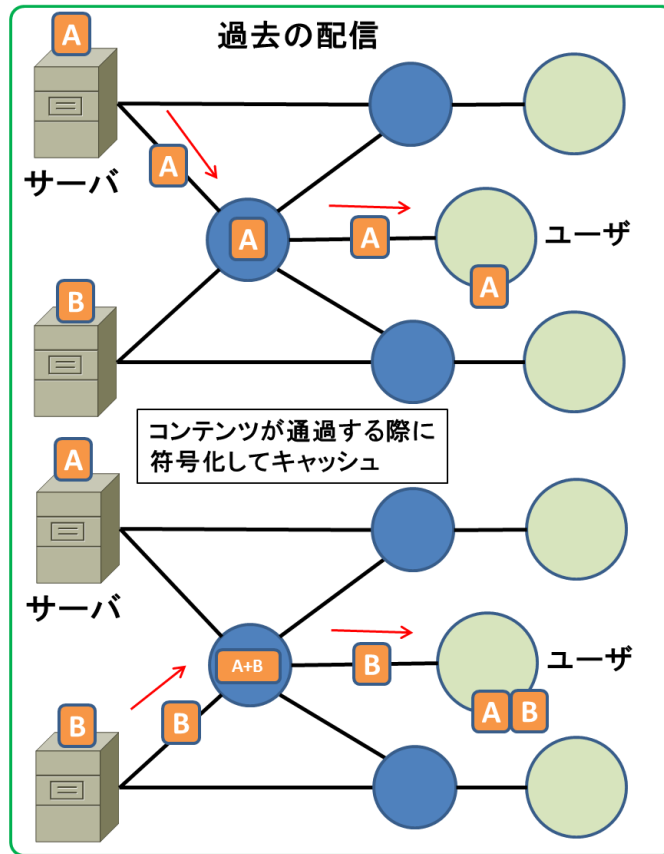


図 4. 提案コンテンツ配信法

3.2 キャッシュアルゴリズム

コンテンツの要求・ダウンロードが行われ、キャッシュ機能を持つルータ装置をコンテンツが通過した際、当該ルータ装置は、通過したコンテンツをキャッシュする。この時、不要と思われるコンテンツを逆にキャッシュから削除する必要がある。本研究では、この様な場合においては、コンテンツ要求がヒットしてダウンロードされる頻度が最も少ないコンテンツを削除することとする。コンテンツ要求がヒットしてダウンロードされる頻度を表すコンテンツの優先度は、次のような指標を用いて測定する。最初に、キャッシュされたコンテンツに対して、コンテンツの ID とは別に、キャッシュ内での優先度の指標として値 0 を与える。キャッシュしたコンテンツは、次のコンテンツ要求が到着した際にダウンロードすることが可能であり、実際にダウンロードされたキャッシュコンテンツは、キャッシュ内での優先度の指標を 2000 増加させる。また、キャッシュを有するルータ装置にコンテンツ要求は到着したが、ダウンロードされなかったキャッシュコンテンツは、それぞれ指標を 1 減少させる。あるコンテンツをキャッシュする際、キャッシュが満杯であり、ネットワーク符号化も行われない場合、既にキャッシュされているコンテンツを捨てる必要があるので、指標の最も小さいコンテンツを削除する。

3.3 ネットワーク符号化アルゴリズム

キャッシュが満杯である時、既存のキャッシュコンテンツと新しくキャッシュするコンテンツをネットワーク符号化することによって、既存のキャッシュコンテンツを捨てることなく、新しいコンテンツをキャッシュすることが可能となる。ネットワーク符号化するコンテンツは、同じ受信者が配信を要求する互いに関連性の強いコンテンツである必要がある。そのため、新しくキャッシュするコンテンツと ID の距離が、予め決められた符号化閾値よりも小さな既存キャッシュコンテンツを、新しくキャッシュするコンテンツとネットワーク符号化を行うコンテンツ候補とする。CCN においては、コンテンツ ID が階層的に与えられるため、新しくキャッシュするコンテンツの ID と比較して、一致するプレフィックスが予め決められた閾値よりも長いコンテンツが、ネットワーク符号化を行うコンテンツ候補となる。コンテンツ候補が存在しない場合は、最も優先度の指標が小さなキャッシュコンテンツを削除して、新しいコンテンツをキャッシュする。

ネットワーク符号化を行うキャッシュコンテンツ候補が複数存在する場合、以下の 3 種類の方法によって、ネットワーク符号化を行う 1 個のコンテンツを選択する。

方法 1：新しくキャッシュするコンテンツと最も ID の近いキャッシュコンテンツ候補とネットワーク符号化を行う。(MN)

方法 2：最も優先度の指標が大きいキャッシュコンテンツ候補とネットワーク符号化を行う。(HF)

方法 3：最も優先度の指標が小さいキャッシュコンテンツ候補とネットワーク符号化を行う。(LF)

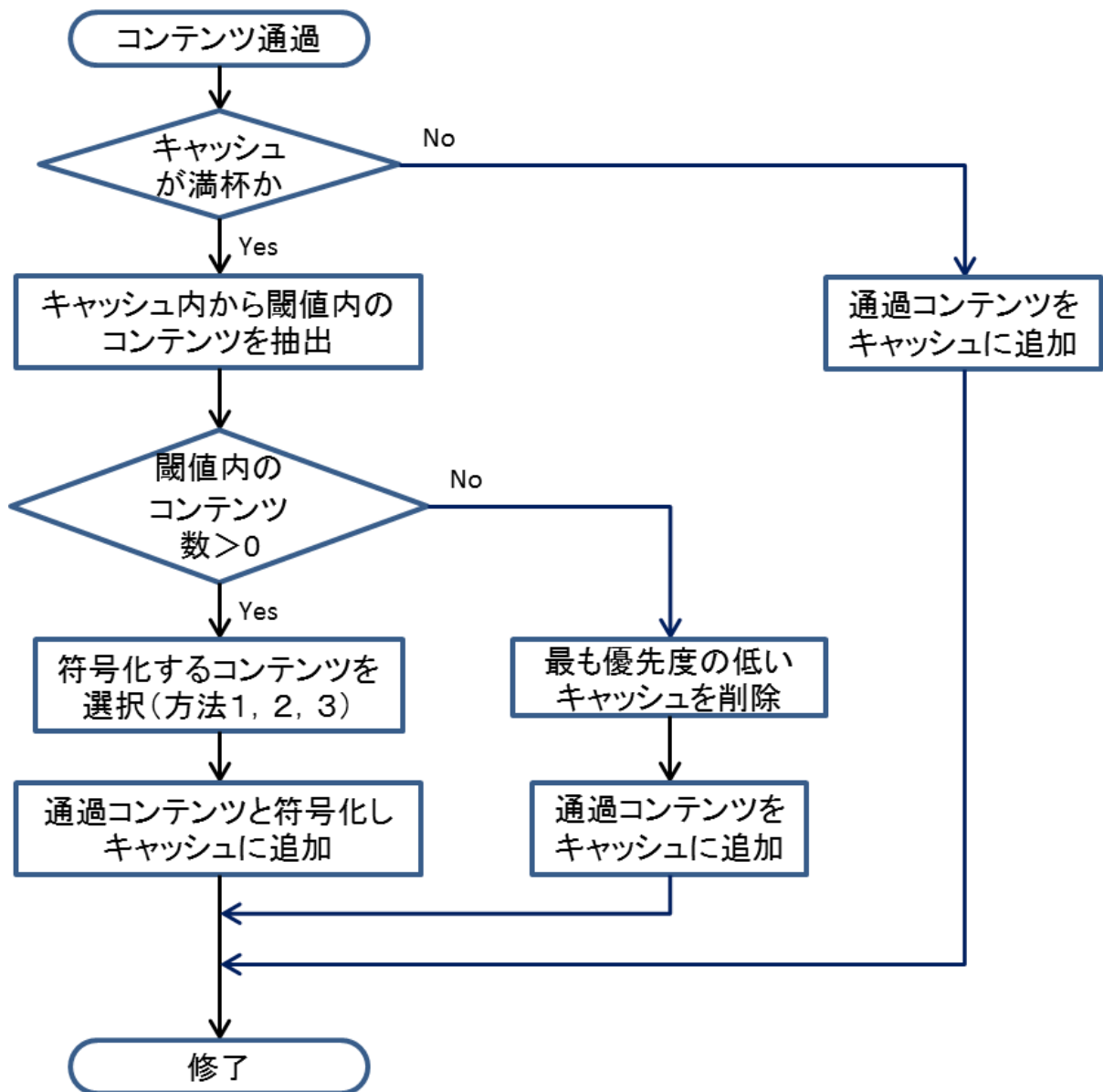


図5. ネットワーク符号化フロー

3.4 コンテンツ配信時の処理手順

図 5 を用いて、コンテンツ配信の流れを説明する。まず、コンテンツサーバが、ネットワークに自身の所持しているコンテンツ ID を広告し、コンテンツルータ装置が、それを基にしてコンテンツ ID の経路情報である FIB を設定する。次に、ユーザがコンテンツを要求する時に、Interest メッセージを送信し、各コンテンツルータ装置は、FIB の経路情報を使って、Interest メッセージのルーティングを行う。ユーザが、特定のコンテンツではなく、ある範囲のコンテンツを要求する際には、その範囲に対応するコンテンツ ID のプレフィックスを Interest メッセージに指定する。各コンテンツルータ装置は、Interest メッセージに指定されたプレフィックス長と、FIB の各エントリに指定されているプレフィックス長とを比較して、短い方の長さまでのプレフィックスが一致していれば、有効な FIB エントリと見なして、Interest メッセージのルーティングを行う。

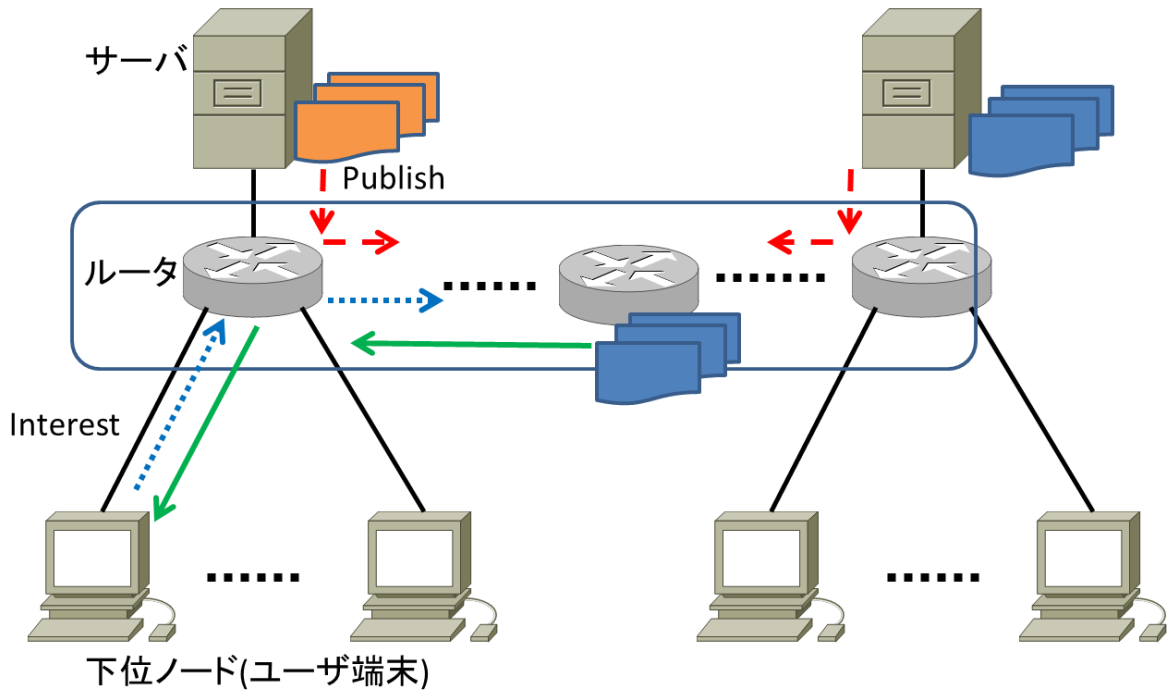


図 6. コンテンツ配信構成

大規模なネットワークでは、各コンテンツサーバがネットワーク全体にコンテンツ ID を広告することは不可能であり、各コンテンツサーバは近辺のコンテンツルータ装置のみにコンテンツ ID を広告する。また、ユーザもコンテンツ取得遅延等の関係で、近辺のコンテンツルータ装置のみに **Interest** メッセージを送信する。従って、最初は、コンテンツサーバに近接するコンテンツルータ装置に接続されているユーザのみが、コンテンツを取得できる。**Data** メッセージとしてコンテンツが転送される経路上のコンテンツルータ装置においては、予め決められたポリシーに従って、コンテンツが **CS** 中にキャッシングされる。新たにコンテンツをキャッシングしたコンテンツルータ装置は、コンテンツサーバと同様に、近辺のコンテンツルータ装置にコンテンツ ID を広告する。このようなキャッシング処理とコンテンツ ID 広告の繰り返しによって、コンテンツを取得できるユーザの範囲を広げて行くことができる。

ネットワーク符号化されたコンテンツをキャッシングした時は、コンテンツ ID として、ネットワーク符号化の元になったコンテンツの ID に共通するプレフィックスを広告する。また、ネットワーク符号化されたコンテンツの **CS** エントリーも、符号化されたコンテンツの ID に共通するプレフィックスを指定する。そして、ネットワーク符号化されていないキャッシュコンテンツの場合と同様に、**CS** エントリーに指定されたコンテンツ ID のプレフィックスが、**Interest** メッセージに指定されたコンテンツ ID のプレフィックスを含む時、ヒットしたキャッシュコンテンツとしてダウンロードする。すなわち、ネットワーク符号化された元の全てのコンテンツが、要求範囲のコンテンツである時に限って、ヒットしたキャッシュコンテンツと見なしてダウンロードする。ネットワーク符号化されたコンテンツをダウンロードしたユーザは、可能であれば、既に取得したコンテンツを使って、ネットワーク復号化を行う。

4. 提案コンテンツ配信法の評価

本章ではシミュレーション評価の詳細と評価結果を示す。

4.1 評価対象ネットワーク

今回の評価において使用するネットワークは、100 ノード 150 リンクで構成されるスケールフリーネットワークである。スケールフリーネットワークとは、ノード次数が冪分布に従うようなネットワークであり、一部のノードが膨大な接続リンクを持つ一方で、ほとんどのノードは極僅かなノードとしか繋がっていない。実際の IP ネットワークの構造は、この様な性質を持っているとされている。評価結果の偏りを避けるため、5 種類の 100 ノード 150 リンクのネットワークを生成し、それぞれについてシミュレーション評価を行った結果の平均を示した。

4.2 シミュレーション内容

本研究におけるシミュレーションで想定したネットワーク構成を図に示す。ネットワークを構成する各ノードはルータ装置とコンテンツサーバで構成される。各ノードは 10 個の下位ノードを収容しており、各下位ノードにはランダムに一個ずつコンテンツが予め割当てられている。下位ノードに割当てられたコンテンツは、当該下位ノードを収容しているノードのコンテンツサーバに予めアップロードされているものとする。シミュレーションでは、各下位ノード間で、それらのアップロードされたコンテンツを相互に取得する。

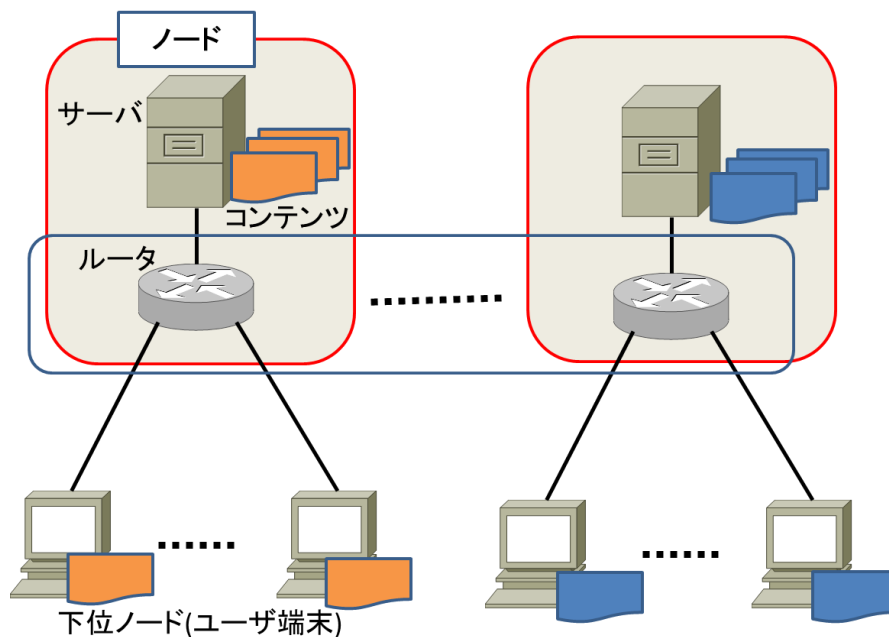


図 7. シミュレーションネットワーク構成

コンテンツ ID は、便宜上 0.0 以上 1.0 未満の実数によって表され、2つのコンテンツ間の距離は ID を表す 2つの実数の距離で示される。但し、コンテンツ ID が 0.0 であることは、コンテンツ ID が 1.0 であることと同値であり、コンテンツ間の距離も 0.0 以上 1.0 未満の実数が割当てられた円周上の距離として計算される。各下位ノードが取得を試みるコンテンツは、自身が最初に保持していたコンテンツに依存しており、最初に保持していたコンテンツの ID を中心として、一定範囲内の ID を持っているコンテンツのみを収集する。複数のノードが、所望するコンテンツを保持している場合は、よりホップ数の小さいノードからダウンロードを行う。また、ホップ数が予め決められた値以上であるノードからは、ダウンロードを行わない。

コンテンツ要求を行い、コンテンツを得るまでの 1 サイクルを説明する。まず、100 ノードのうちからランダムに 1 個のノードを選択し、さらにその 10 個の下位ノードからランダムに 1 個の下位ノードを選択する。そして、選ばれたノードから予め決められたホップ数内に存在するコンテンツ群から、選ばれた下位ノードが初めに与えられたコンテンツと ID が近いコンテンツを全て選び出し、それぞれ最も近いノードからダウンロードを行う。これを 1 回のサイクルとして、シミュレーションを行う。ネットワーク符号化されたコンテンツの場合は、ネットワーク符号化の元になった全てのコンテンツの ID が要求範囲内である時に、ダウンロードを行う。既に取得したコンテンツを使って、ダウンロードしたネットワーク符号化コンテンツを復号化できない場合、ダウンロードしたネットワーク符号化コンテンツは棄却される。

4.3 評価方法

評価対象とするネットワークは、5種類の100ノード150リンクのスケールフリーネットワークである。更に、リンク数が増加した場合と比較評価するために、5種類の100ノード200リンクのスケールフリーネットワークについても評価を行う。評価結果として、5種類のネットワークに関する平均を算出する。

キャッシュを持たせるノードは、次数の大きいノードから優先して選択する。但し、次数が等しいノードが複数存在する場合は、ランダムに選択する。また、比較評価のため、ノード次数とは関係なくランダムに選択する場合も評価する。キャッシュを持たせるノードの数は、1~100の間で変化(1, 2, 5, 10, 20, 50, 100)させて、それぞれの場合について評価する。

所望のコンテンツのダウンロードを行う際のホップ数制限は3、つまり4ホップ以上離れたノードからはダウンロードしないものとする。これは、所持しているコンテンツや要求をネットワーク全体に送出するのは現実的でないという考えからの制限である。

評価で使用するコンテンツ要求範囲とは、要求の基準となる各ノードに与えられた最初のコンテンツIDからの数値の範囲であり、この数値内のIDを持つコンテンツを収集する。また、符号化閾値は、ネットワーク符号化を行うコンテンツの候補を絞るための値で、ダウンロードされてきたコンテンツのIDを基準に閾値の範囲内のIDを持つコンテンツをキャッシュ内から選択するために設定する。

各ネットワークについて、コンテンツ要求のサイクルは10000回とする。

下記の様に条件を変えてシミュレーション評価を行い、各ノードにおける平均収集コンテンツ数の推移や最終的な収集数を評価する。尚、最初に割り当てられたコンテンツも収集コンテンツとしてカウントする。

1. コンテンツ要求範囲 ± 0.005 、符号化閾値 ± 0.005 、キャッシュ総量 1000
2. コンテンツ要求範囲 ± 0.0025 、符号化閾値 ± 0.0025 、キャッシュ総量 1000 (コンテンツ要求・符号化の範囲変化)
3. コンテンツ要求範囲 ± 0.01 、符号化閾値 ± 0.01 、キャッシュ総量 1000 (コンテンツ要求・符号化の範囲変化)
4. コンテンツ要求範囲 ± 0.005 、符号化閾値 ± 0.005 、キャッシュ総量 1000、キャッシュ時ホップ数制限 2(通過コンテンツをキャッシュする際、送信元が1ホップ以内の場合キャッシュを行わない)
5. コンテンツ要求範囲 ± 0.005 、符号化閾値 ± 0.005 、キャッシュ総量 500(キャッシュの容量が通常の2分の1)
6. コンテンツ要求範囲 ± 0.005 、符号化閾値 ± 0.005 、キャッシュ総量 2000(キャッシュの容量が通常の2倍)
7. コンテンツ要求範囲 ± 0.005 、符号化閾値 ± 0.005 、キャッシュ総量 1000、ネットワークの総リンク数 200(ネットワークのリンク数が多い)

8. ランダムにキャッシュノードを決定, コンテンツ要求範囲 ± 0.005 , 符号化閾値 ± 0.005 , キャッシュ総量 1000

4.4 評価結果

シミュレーション評価を行った結果、以下のようになった。

4.4.1 10000 検索での所持コンテンツ数の変位

100 検索ごとに各下位ノードが保持しているコンテンツ数の平均を取り、グラフに表した。

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュノード数 10，キャッシュ容量 100，符号化無・有の場合のグラフは以下のようになった。

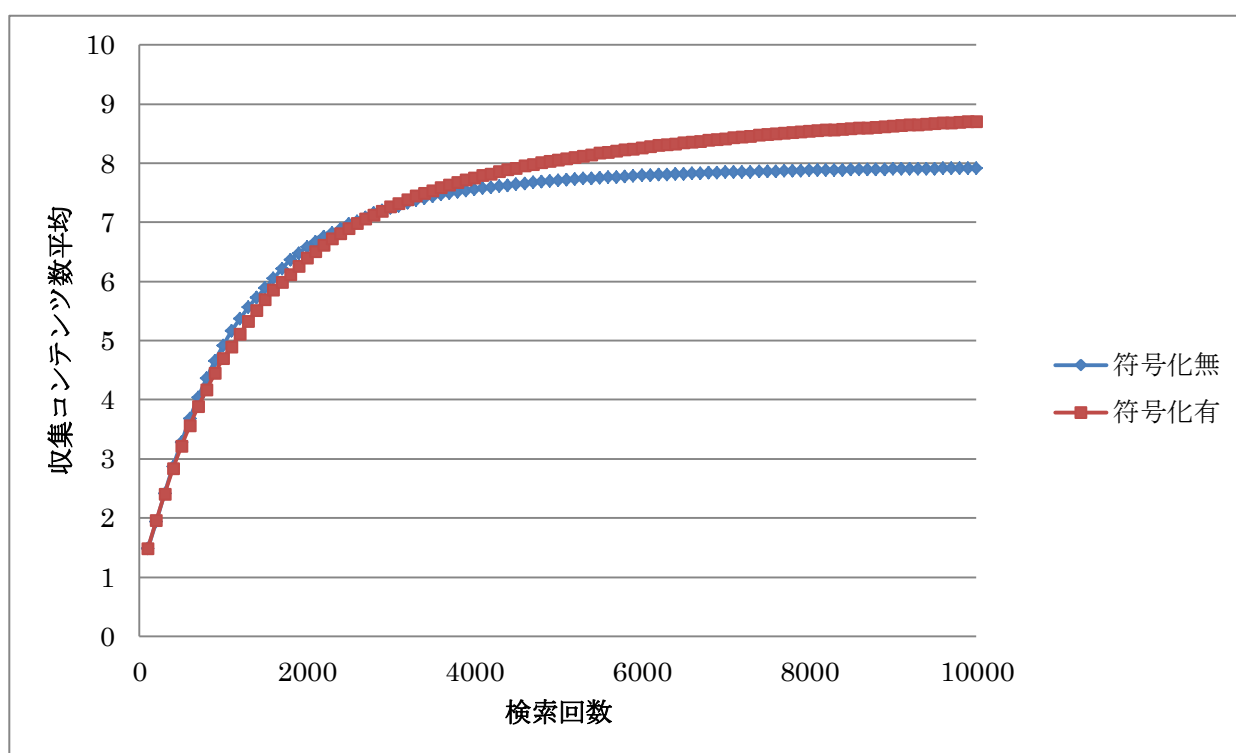


図 8. 収集コンテンツ数の検索回数による推移 1

グラフは右肩上がりであり、始めに大きく上昇し、収束していく形となった。ネットワーク符号化無しの場合、所持コンテンツ数の平均は約 8 で収束している。一方、符号化を使用した際は、所持コンテンツ数の平均は 9 弱で収束している。

コンテンツ要求範囲と符号化範囲を広げ、コンテンツ要求範囲 ± 0.01 、符号化閾値 ± 0.01 、キャッシュノード数 10、キャッシュ容量 100 とした場合のグラフは以下のようになった。

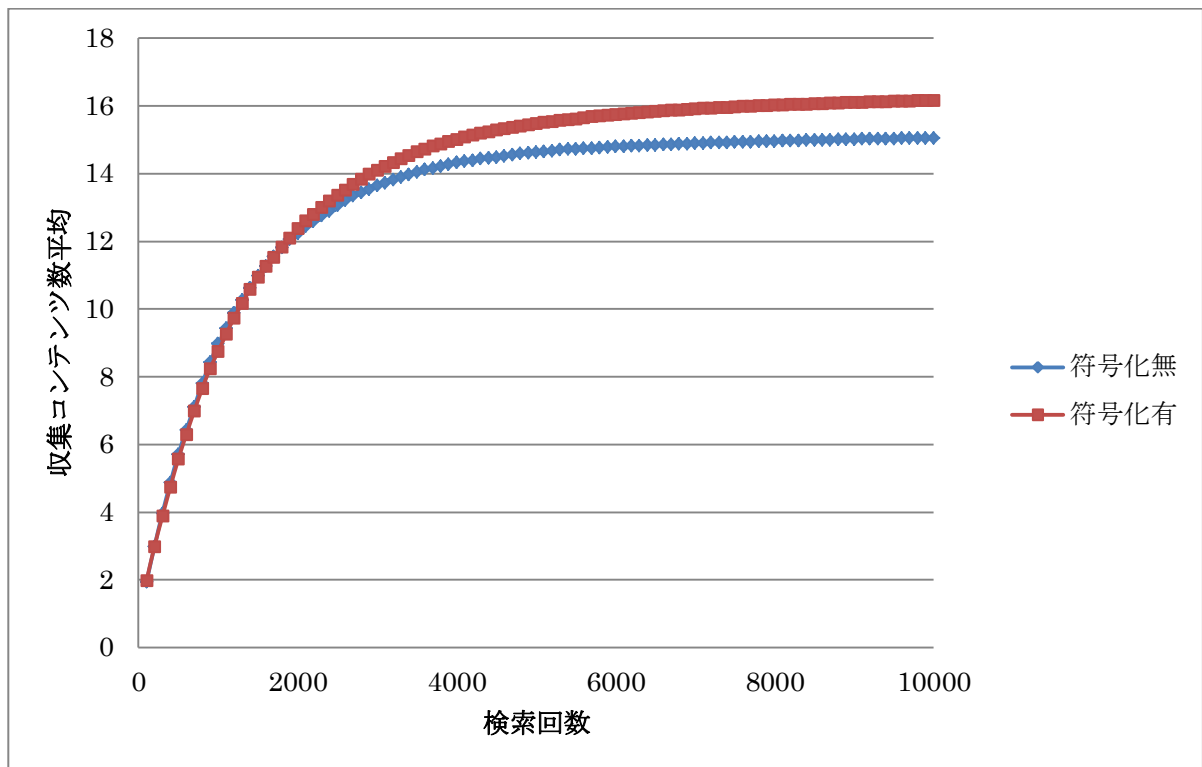


図 9. 収集コンテンツ数の検索回数による推移 2

コンテンツ要求範囲を倍の ± 0.01 にした場合も同様に始めに大きく上昇し、徐々に収束していく形のグラフとなった。

ネットワーク符号化を使用していない場合、所持コンテンツ数の平均は約 15 で収束している。符号化を使用した場合、所持コンテンツ数の平均は約 16 で収束している。

コンテンツ要求範囲と符号化範囲を狭め、検索範囲 ± 0.0025 、符号化閾値 ± 0.0025 、キャッシュノード数 10、キャッシュ容量 100 とした場合のグラフは以下ようになった。

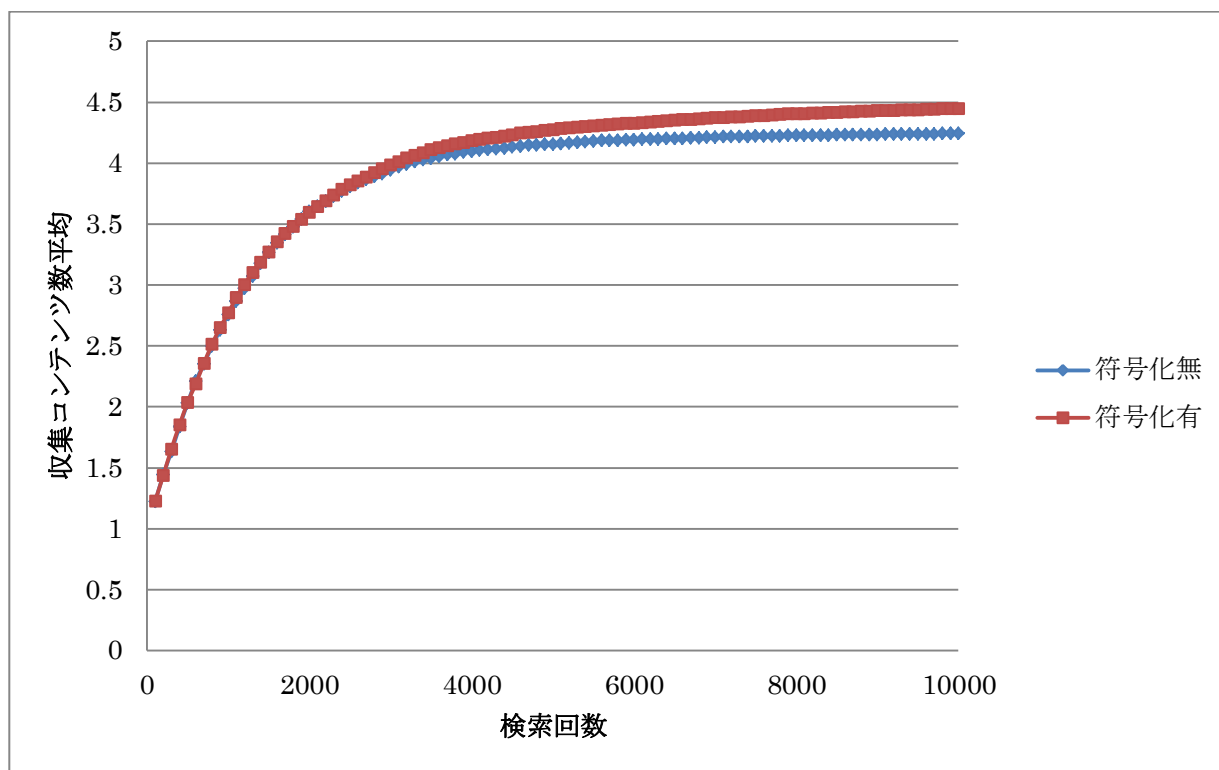


図 10. 収集コンテンツ数の検索回数による推移 3

符号化を使用した場合、所持コンテンツ数の平均は約 4.2 で収束している。

符号化を使用していない場合、所持コンテンツ数の平均は約 4.5 で収束している。

4.4.2 キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュ総量 1000 のパラメータでは以下のようなグラフとなった。

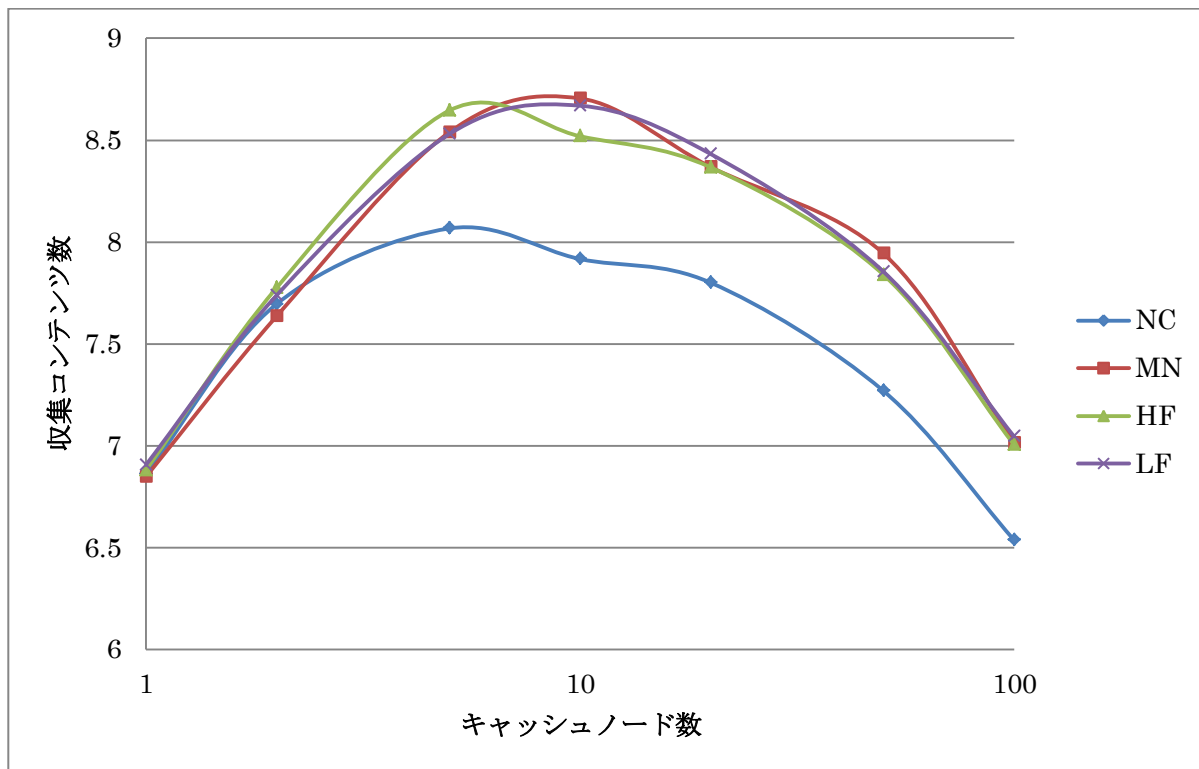


図 11. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 1

符号化を使用しない場合(NC)，最高はキャッシュノード数 5 の時で，約 8.1 個，最低はキャッシュノード数 100 の時で，約 6.5 個であった。

一方，符号化を使用した場合，最も頻度の高いものと符号化する手法で，キャッシュノード数 5 個の時，それ以外ではキャッシュノード数 10 個の時，平均収集コンテンツ数が多かった。キャッシュノード数が 1 個の時集められた数が少なく 6.9 程度，多い場合はどれも 8.7 個程度であった。

4.4.3 コンテンツ要求範囲，符号化範囲を狭めた際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.0025 ，符号化閾値 ± 0.0025 ，キャッシュ総量 1000 の場合のグラフは以下のようになった。

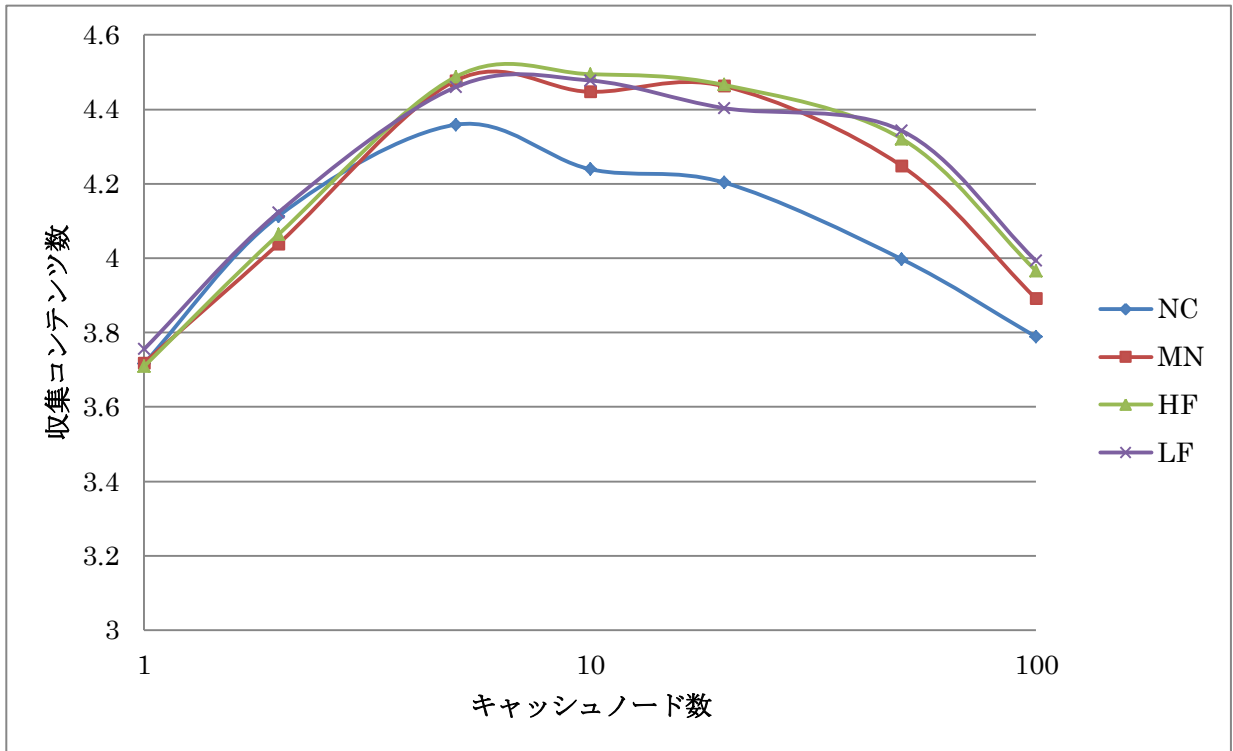


図 12. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 2

コンテンツ要求範囲と符号化閾値を半分の 0.0025 にした時，符号化を使用しない場合では，キャッシュノード数 5 個の時が高く，約 4.3 個のコンテンツが収集された。低い時はキャッシュノード数 1 の時で 3.7 程度となった。

符号化を使用した場合は，どれもキャッシュノード数 1 の時が最も低く 3.7 程度であり，キャッシュノード数 5，10，20 の時に 4.4 強とほぼ同じ値になった。

4.4.4 コンテンツ要求範囲，符号化範囲を広げた際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.01 ，符号化閾値 ± 0.01 ，キャッシュ総量 1000 の場合のグラフは以下のようになった。

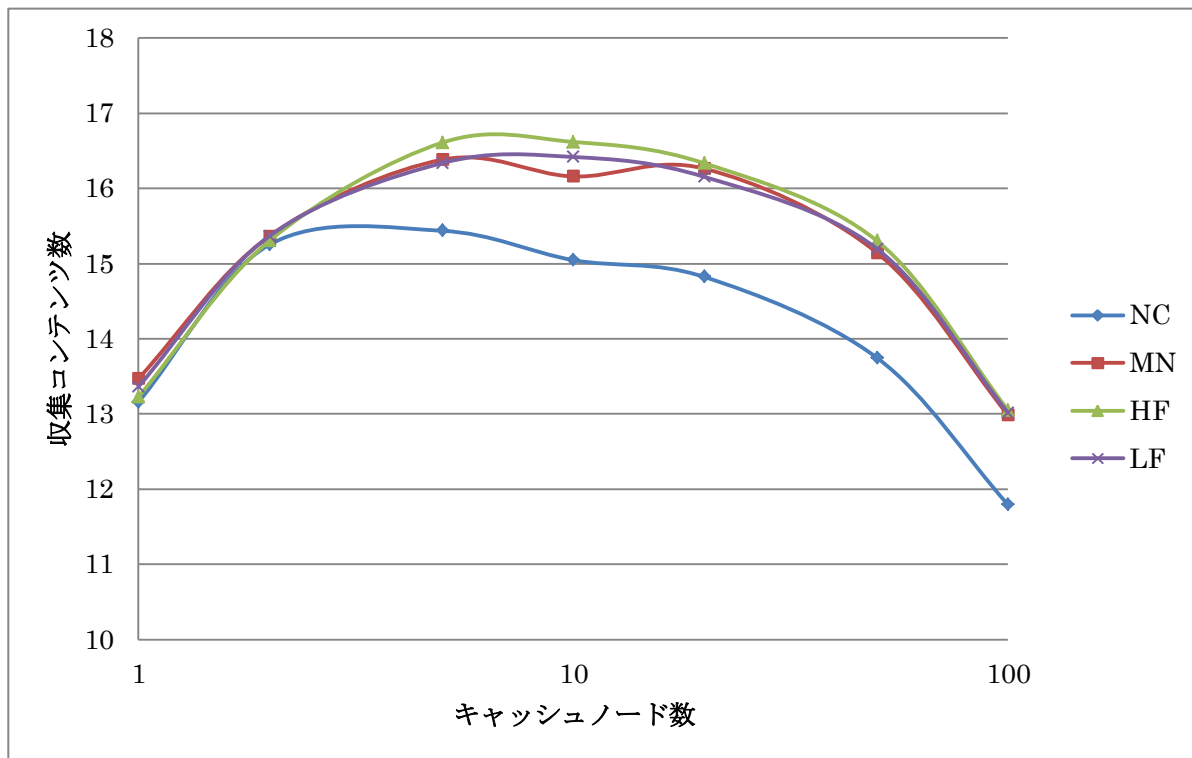


図 13. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 3

コンテンツ要求範囲と符号化閾値を 2 倍の 0.01 にした場合，符号化を使用しない時，キャッシュ数 2，5 で 15.5 弱の値をとり，キャッシュ数 100 の時に最も低い 12 を下回る数となった。

符号化を使用する場合は，キャッシュノード数 5，10 の時に多く収集できており，16.5 個程度となった。

4.4.5 キャッシュする際にホップ数制限をかけた際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュ総量 1000，キャッシュホップ制限 2(通過コンテンツをキャッシュする際送信元が 1 ホップ以内の場合キャッシュを行わない)の場合のグラフは以下ようになった。

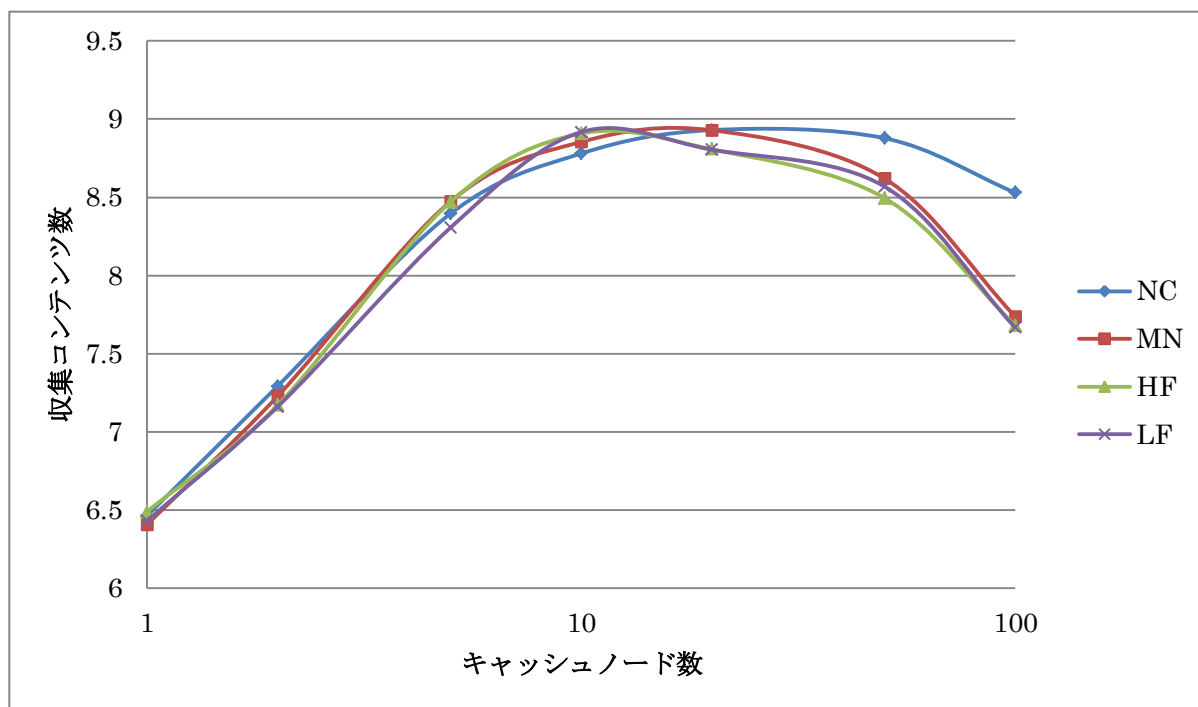


図 14. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 4

キャッシュに保存する際にホップ数制限をつけた場合では，符号化を使用しない方法で，キャッシュノード数 20，50 の時に 9 弱のコンテンツを収集することができた。符号化を使用しない場合，キャッシュノード数 10，20 の時に同程度の 9 個弱を収集することができたが，それよりキャッシュノード数が多い場合では符号化を使用しない場合よりも低くなっている。

4.4.6 キャッシュ容量が半分の際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュ総量 500(キャッシュの容量が通常の 2 分の 1)の場合のグラフは以下ようになった。

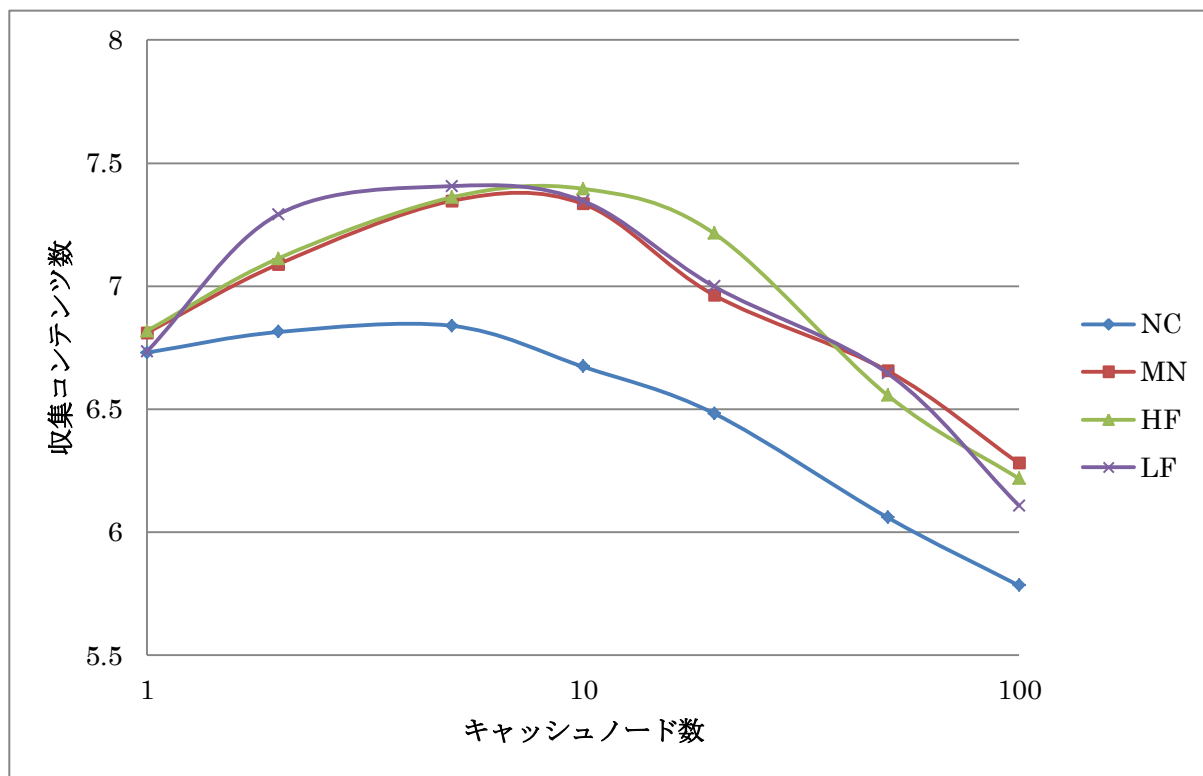


図 15. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 5

ネットワーク全体のキャッシュ容量を半分の 500 にした場合，符号化を使用しない条件ではキャッシュノード数 5 の時に収集可能なコンテンツ数が多く，それ以降キャッシュノード数が多くなると次第に下がっていくグラフとなっている。

符号化を使用する場合では，キャッシュノード数 5，10 の時に多くのコンテンツを収集できており，同様にキャッシュノード数が増えていくと収集可能なコンテンツ数は減っている。

4.4.7 キャッシュ容量が倍の際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 , 符号化閾値 ± 0.005 , キャッシュ総量 2000(キャッシュの容量が通常の2倍)

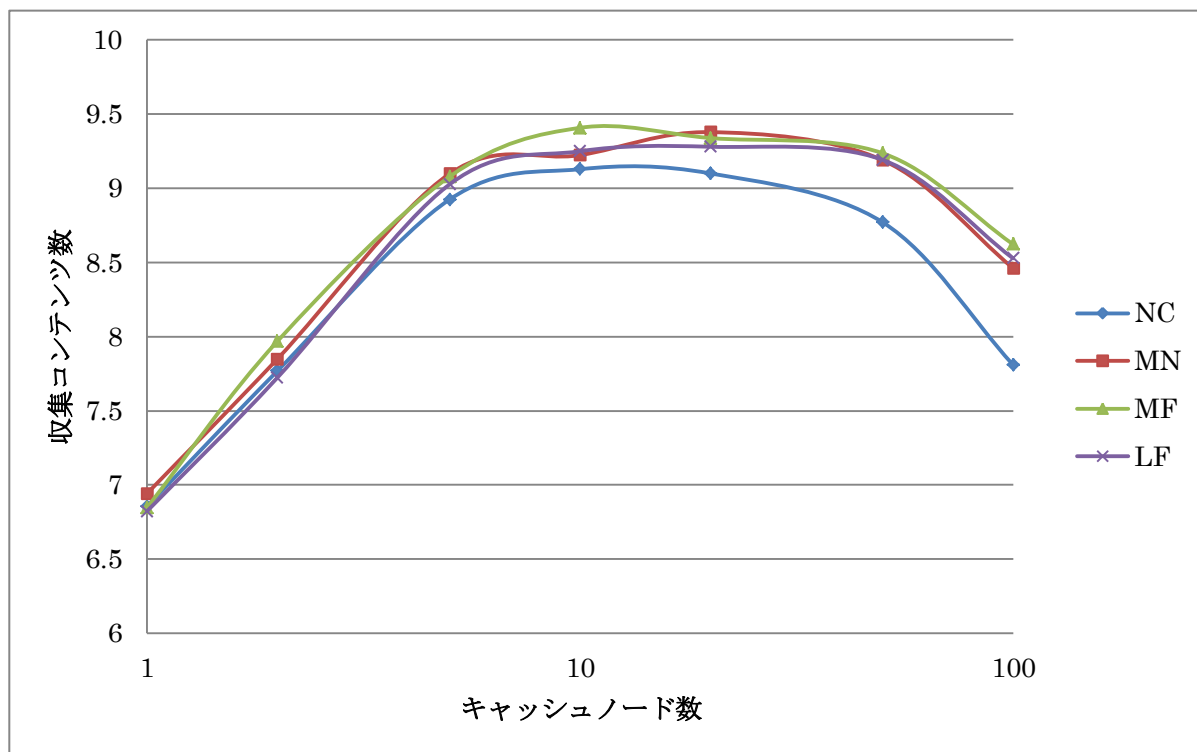


図 16. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 6

ネットワーク全体のキャッシュ容量を2倍の2000にした時、計算結果はどれも、キャッシュノード数が10, 20の場合に多くのコンテンツを集めることができた。キャッシュノード数が1~20までは収集可能なコンテンツの個数に大きな差は見られないが、それよりキャッシュノード数が多くなると符号化を使用しない場合の結果がより大きく下がった。

4.4.8 ネットワークリンク数を増やした際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュ総量 1000，ネットワークリンク数 200(ネットワークのリンク数が多い)の場合のグラフは以下のようになった。

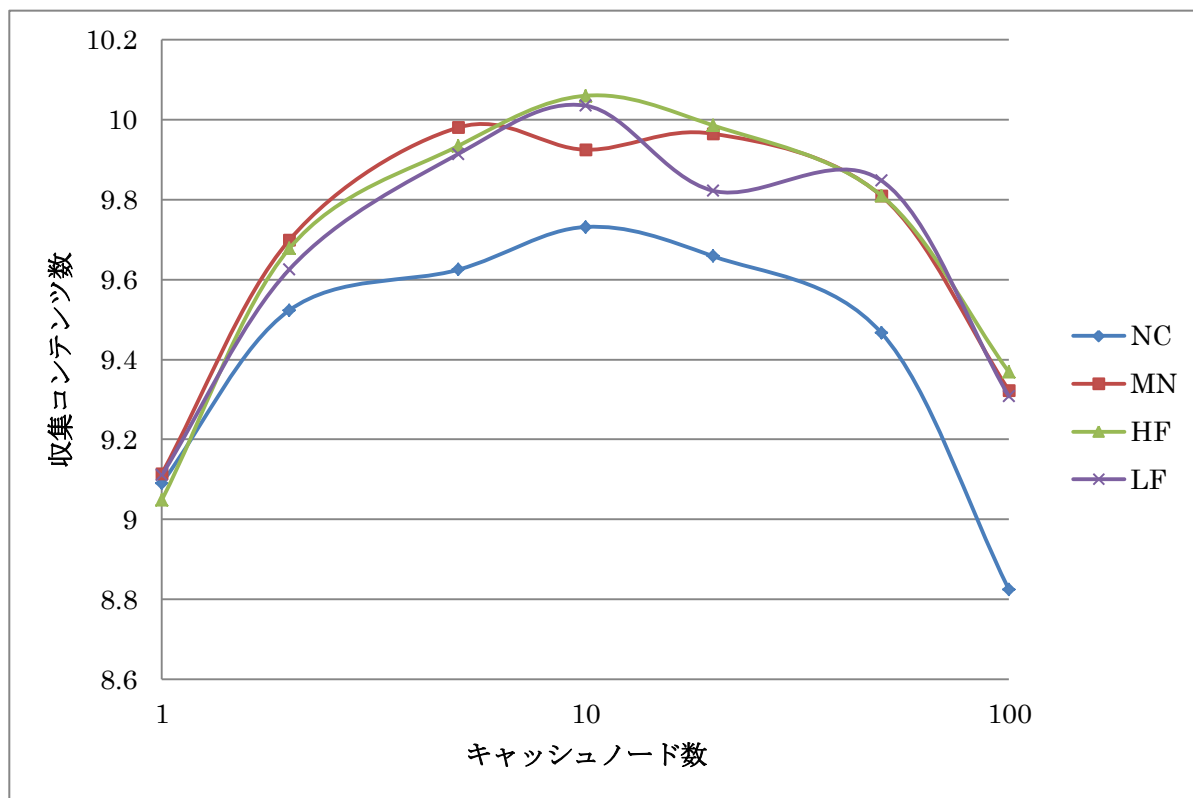


図 17. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 7

これまでに使用してきたネットワークとは別に，リンク数を増やしたネットワークで計算を行った場合，コンテンツの収集効率はより高くなり，期待値である 10 個に近づいており，符号化を使用した場合ではキャッシュノード数 5, 10, 20 辺りで高い結果が出ている．符号化を使用しない場合では，キャッシュノード数 10 の時に大きい値になっているが期待値の 10 個には届かず，キャッシュノード数が増えた際の収集可能コンテンツ数減少の幅も大きい。

4.4.9 ランダムにキャッシュノードを決定した際の収集コンテンツ数変化

コンテンツ要求範囲 ± 0.005 ，符号化閾値 ± 0.005 ，キャッシュ総量 1000 の場合のグラフは以下のようになった．

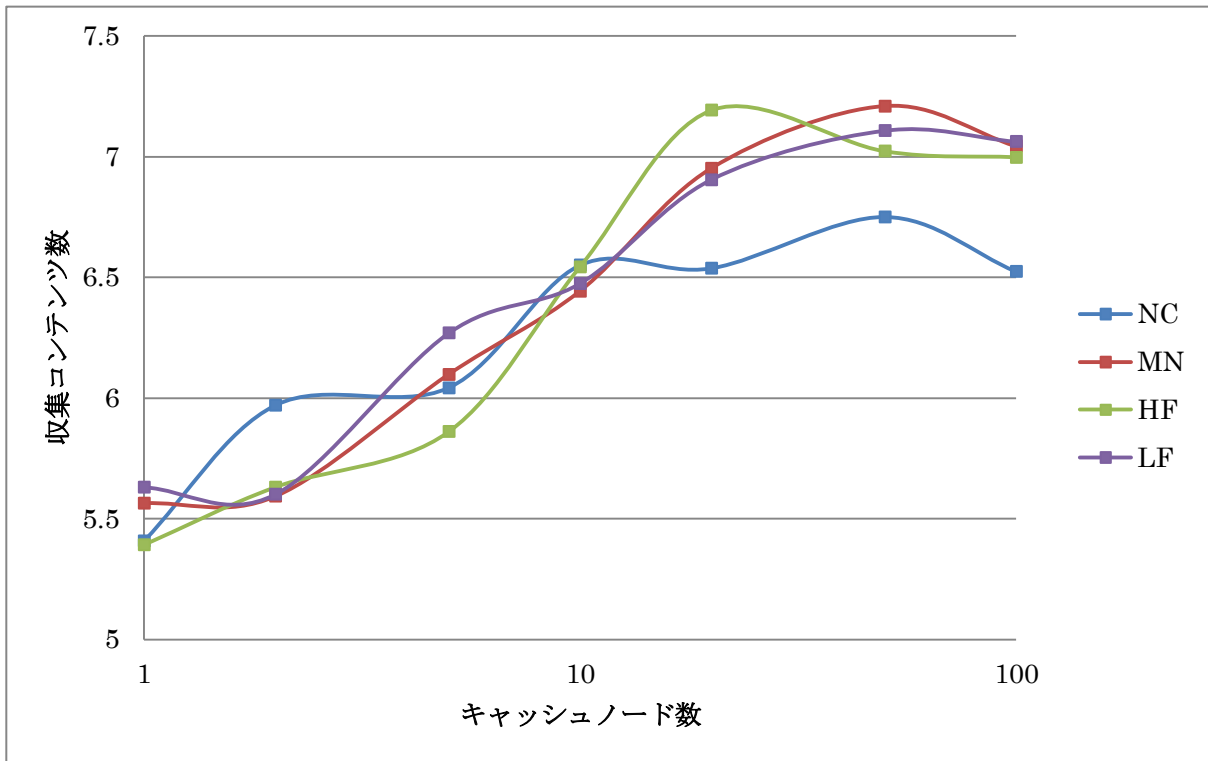


図 18. キャッシュノード数による収集コンテンツ数の変化 8

これまでのシミュレーションではリンク数の多いノードに優先的にキャッシュ容量を与えていたが，それをランダムにした場合，結果はどれもほぼ右肩上がりのグラフとなった．また，符号化を使用する・しないに大きな差は見られなかった．収集可能なコンテンツ数は，リンク数の多いノードにキャッシュ容量を与えた場合と比べて少ない．

4.5 考察

4.4.1 より、各ノードが保持するコンテンツ数は、コンテンツ要求・ダウンロードを繰り返すことにより増加するが、ネットワーク全体で 10000 回のコンテンツ要求・ダウンロードを行うことによって、ほぼ収束することが分かる。これは、10000 回のコンテンツ要求・ダウンロードの間に、中間ノードのキャッシュにコンテンツが蓄積され、各ユーザの要求コンテンツが、各ユーザを収容するノードから 3 ホップ以内に集まって来るからである。各ノードが保持するコンテンツ数が収束していることから、10000 回のコンテンツ要求で、各ユーザがダウンロード可能なコンテンツは、全て取得し終わっていると判断できる。

4.4.2~4.4.4 から、キャッシュを装備したノード数が極端に少ない場合と極端に多い場合、取得できるコンテンツ数が少ないことが分かる。キャッシュノードが少ない場合は、キャッシュ容量が大きいですが、キャッシュノードを通過するコンテンツの種類が限られる。そのため、キャッシュコンテンツに多様性をもたらすことができず、キャッシュを効率良く利用できなかつたと考えられる。キャッシュノードが多い場合は、キャッシュ一つ一つの容量が小さくなるため、キャッシュコンテンツの入れ替わりが激しい。そのため、キャッシュにヒットにくく、キャッシュの利用効率が低くなつたと考えられる。

ネットワーク符号化を適用する場合の方が取得できるコンテンツ数が多く、キャッシュ利用効率が向上していることが分かる。キャッシュコンテンツのネットワーク符号化を行うことで、与えられたキャッシュ容量の下で、キャッシュコンテンツの多様性を高めることができるため、性能向上につながつたと判断される。しかしながら、3.3 節で述べたネットワーク符号化を行う 3 つの方法の間で、差異はほとんど見られなかつた。

コンテンツ要求の範囲が ± 0.005 の場合、最終的に取得されるコンテンツ数の期待値は 10.0 であるが、最もコンテンツ取得効率が高い場合でも、その値に届いていない。これは、ダウンロードにホップ数制限をかけていることが主な要因である。コンテンツの通過によるキャッシュの更新で、ダウンロード可能となることが期待されるが、近隣に同じコンテンツを欲する下位ノードがない場合、コンテンツが近くのキャッシュに到達しないため、ダウンロードができない。そのため、実際のコンテンツ取得数が、期待値より低くなつていると考えられる。

コンテンツ要求の範囲を半分にした場合は、要求するコンテンツ数も半分になるため、キャッシュノード数の違いによる差が小さくなつている。ネットワーク符号化を適用した場合と適用しなかつた場合の差も、ほぼ半分であるが、全体的なコンテンツ取得数は、半分より少し大きな値になつている。これは、それぞれの下位ノードが要求するコンテンツ数が半分になつたことにより、ネットワーク内でのコンテンツの移動が少なくなり、キャッシュの更新頻度が減少し、キャッシュのヒット率が上がった

ためと推測される。

同様に、コンテンツ要求の範囲を2倍にした時も、ネットワーク符号化適用・不適用の差は、ほぼ2倍であるが、全体的なコンテンツ取得数は2倍より、若干少ないことが分かる。各下位ノードが要求するコンテンツ数が2倍になったことにより、ネットワーク内のコンテンツ移動が激しくなり、キャッシュの更新頻度が上がり、キャッシュのヒット率が下がったためと思われる。

4.4.5 より、コンテンツを中継ノードでキャッシュする際にホップ制限をかけた場合、ネットワーク符号化の使用・不使用によるコンテンツ収集数の差は、キャッシュノード数1~20の間ではほとんど見られない。しかし、20よりキャッシュノード数が増えると、ネットワーク符号化使用の場合は大きく減少するにも関わらず、ネットワーク符号化使用の場合は減少数が少ないことが見て取れる。これは、キャッシュする際に制限をかけたためにキャッシュの利用頻度が減少し、ネットワーク符号化を行う機会も減ったためキャッシュの多様性を高めることができなかつた事が原因であると考えられる。一方、ネットワーク符号化を使用しない場合は、キャッシュの更新の頻度が減ったため、コンテンツがキャッシュに残りやすくなったためにキャッシュヒットが多くなったと推測される。

4.4.6 より、ネットワーク全体のキャッシュ容量を半分にした場合、全体的に収集されるコンテンツの数は減少している。これは、キャッシュ容量が小さくなったことによって、キャッシュが利用されにくくなったことや、キャッシュ内容の多様性が下がったことが原因であると考えられる。また、キャッシュノード数が増えた場合の減少幅が大きいのは、キャッシュが分散されることによってそれぞれの容量が小さくなったことによる影響が、キャッシュノード数が少ない場合より大きいからであると考えられる。キャッシュノードのキャッシュ容量が減ると、頻度の指標が反映されるまもなくキャッシュ内容が更新されてしまい、効率よくキャッシュを使用できないことが原因と推測される。

ネットワーク符号化を使用しない場合、収集コンテンツ数はキャッシュノードの数が5まで小さく上昇し、5よりキャッシュノード数が増えると、収集コンテンツ数は下がる一方であった。ネットワーク符号化を使用しない場合はキャッシュ容量減の影響をより受けやすいと考えられる。

4.4.7 より、ネットワーク全体のキャッシュ容量を 2 倍にした場合、収集コンテンツ数は期待値である 10 に近くなり、効率が向上している。容量が増えたことにより、キャッシュに残りやすくなったため、全体的にコンテンツ収集数が増えていると考えられる。キャッシュノードが多く存在する場合の方が、キャッシュ容量を増大させることによる効率向上の影響を受けやすい事がわかる。容量を増やすことで十分な量のキャッシュを使うことができ、キャッシュを削除する必要が少なくなるのでネットワーク符号化の有無の差が小さくなっていると考えられる。

4.4.8 よりネットワークを構成するリンク数が増えると、コンテンツ収集の効率が高くなることが分かる。ネットワーク符号化の使用・不使用によるコンテンツ収集数の差は小さくなっているもののネットワーク符号化を使用したほうが高効率である。コンテンツ収集数はキャッシュノード数 5, 10, 20 辺りでほぼ期待値である 10 に近い値をとっている。

リンク数が増えることで少ないホップ数で到達可能なノードが増えたため収集効率が高くなったと考えられる。

4.4.9 よりランダムにキャッシュノードを設定した場合、キャッシュノード数が増えるほど収集コンテンツ数が増大している。収集コンテンツ数は、リンク次数の多い順にキャッシュを与えた場合に比べ低い。これは、リンク数が少ないノードにキャッシュが割り振られた事により、アクセスが少ない場所にキャッシュが置かれ、利用効率が悪かったからだと考えられる。ランダムにキャッシュを決定した場合は、数多くキャッシュを割り振ることにより利用頻度の高いノードにキャッシュを持たせられる可能性が高くなるため、右に行くほどコンテンツ収集数が高くなっていると考えられる。

5. 結論

本論文では、CCNにおいてルータ装置にネットワーク符号化機能を付与し、配信する方法を提案した。CCN環境でコンテンツを取得する際は、近くのルータキャッシュに要望コンテンツが存在した方が高効率である。2つのコンテンツに強い関連性があり、片方のコンテンツを取得した受信者は、高い確率でもう一方のコンテンツを取得すると仮定すると、2つのコンテンツをネットワーク符号化して保存することでキャッシュ容量を有効に活用できることが考えられ、コンテンツ識別子が近いもの同士を符号化する手法を提案した。

配信法の評価を行うために、5種類のネットワークを生成し、それぞれについて結果の平均をとった。ネットワークを構成する各ノードはルータ装置とコンテンツサーバで構成され、各ノードは10個の下位ノードを収容しており、各下位ノードにはランダムに一個ずつコンテンツを予め割当てた。シミュレーションでは、各下位ノード間で、それらのアップロードされたコンテンツを相互に取得することを目的とした。

評価の結果、ネットワーク符号化を使用した場合の方がほとんどの状況で、効率が低いことが判明した。また、キャッシュを適用するノードを選択する際は、ランダムではなく、保持リンク数の多い順に適用すると有効であることを示した。ネットワーク全体のキャッシュ容量が限定されている場合、キャッシュノードの数は10(ネットワーク全体のノード数が100)ということが分かった。今回はネットワーク符号化を3つの種類行ったが、それぞれについて特に有効な差は見られなかった。

以上より、提案コンテンツ配信法において、CCNのルータキャッシュにネットワーク符号化機能を付与することで、高効率なコンテンツ配信を実現可能である。

6. 課題と今後の展望

今回のシミュレーションでは、ネットワークを構成するノード数が100のスケールフリーネットワークに限られるものであったので、さらに多様なネットワークでの検証が必要である。また、受信者のコンテンツ要望の基準が固定されているので、要望するコンテンツにバラつきが生じた場合や、基準が変更されたときにどのような変化が生じるかという問題もある。ネットワーク符号化に3つの種類を用いたが、大きな差が見られなかったので、有効なアルゴリズムが存在するか調査する必要がある。

参考文献

- [1] Cisco Inc. Visual Networking Index (VNI), "Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018," 2014.
- [2] Cisco Inc. Visual Networking Index (VNI), "The Zettabyte Era Trends and Analysis," 2014.
- [3] G. Xylomenos, et al., "A Survey of Information-Centric Networking Research," IEEE Communications & Surveys, 2014.
- [4] E. Paik, et al., "Benefits and Research Challenges of Content-Centric Networking," Internet-draft draft-paik-icn-challenges-00, work in progress, January 2013.
- [5] V. Jacobson, et al., "Networking Named Content," ACM CoNEXT 2009.
- [6] S. Fayazbakhsh, et al., "Less Pain, Most of the Gain: Incrementally Deployable ICN," ACM SIGCOMM 2013.
- [7] U. Lee, et al., "Greening the Internet with Content-Centric Networking," ACM EEnergy 2010.
- [8] Faizul Bari, et al. "A Survey of Naming and Routing in Information-Centric Networks," IEEE Communications Magazine, December 2012
- [9] T. Matsuda, et al., "Survey of Network Coding and its Applications," IEICE Trans., Vol. E94-B, No. 3, pp. 698-717, March 2011.
- [10] R. Ahlswede, et al., "Network Information Flow," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 46, No. 4, pp. 1204-1216, Jul. 2000.

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導及びご協力頂いた，電気通信大学大学院情報システム学研究科情報ネットワークシステム学専攻ネットワークコンピューティング学講座の荻野長生客員教授，吉永努教授，入江英嗣準教授に心より感謝致します．