

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・ネットワーク工学専攻 博士前期課程		
氏名	岡田浩希	学籍番号	1731033
論文題目	分散協調色キャッシュを用いた動画ライブ配信の効率化		
要旨	<p>インターネット上に流通する通信量は5年で3倍の速度で増加しており,2022年には動画の通信量が全体の8割を占めると見込まれている。先行研究では,オンデマンド動画配信サービスの通信量削減を目的とした色タグ情報に基づく分散協調キャッシュを提案し,高い通信量削減効果を示した。一方で,ライブ配信に利用することを検討していない。</p> <p>本論文では,先行研究の手法を拡張し,オンデマンド配信におけるさらなる通信量の削減と,ライブ配信の通信効率化を図る。まず,動画の再生位置によって人気の差があることに着目し,動画を部分データに分割して人気の箇所を優先的にキャッシュすることで,限られたキャッシュ領域を効率的に扱う。オンデマンド配信では,部分データに対するアクセス傾向をもとに先行研究の分散協調キャッシュ手法でコンテンツを制御する。国内バックボーンネットワークを模したネットワークトポロジを対象に,アクセス確率と通信ホップ数から通信量を算出するシミュレーション実験を行った。シミュレーション結果では先行研究と比較して,単一階層のバックボーンネットワーク上で最大約79%,複数階層ネットワーク上で最大70%の通信量削減効果を示した。ライブ配信では,リアルタイムに生成されるデータが新しいほど重要であるという想定のもと,時間経過とコンテンツ制御を関連づける。最新のデータは常にユーザの近くに配置し,その他の時間経過したデータは通信量を効率的に削減できるようキャッシュ制御する。3階層構造のリングネットワークを対象に,時間経過とともにユーザが追加され,リクエストを発生させるシミュレーション実験を行った。シミュレーション結果では一般的なキャッシュ制御手法のLRUアルゴリズムと比較して,リクエストが最新データに集中するリクエスト傾向のとき最大39%,リクエストが古いデータにも分散するリクエスト傾向のとき最大約60%の通信量削減効果を示した。</p>		

平成30年度修士論文

分散協調色キャッシュを用いた
動画ライブ配信の効率化

大学院情報理工学研究科
情報・ネットワーク工学専攻

学籍番号： 1731033

氏名： 岡田浩希

主任指導教員: 吉永 努 教授

指導教員： 策力木格 准教授

提出年月日： 平成31年1月28日

(表紙裏)

目次

第1章	序論	1
第2章	関連研究	2
2.1	動画配信サービスの通信量削減	2
2.1.1	VoDサービスの要求傾向と通信削減効果	2
2.1.2	ライブ配信サービスのアクセス傾向とキャッシュ制御	2
2.1.3	チャンク分割制御によるコンテンツ配信	3
2.2	動画配信ネットワークのキャッシュ制御手法	4
2.2.1	単一サーバにおけるキャッシュ制御	4
2.2.2	複数のサーバを組み合わせる分散協調キャッシュ制御	4
第3章	分散協調キャッシュのVoD配信への応用	6
3.1	色キャッシュを組み合わせたチャンク分割制御	6
3.1.1	チャンク分割キャッシュ制御	6
3.1.2	色キャッシュ制御	6
3.2	評価	8
3.2.1	評価条件	8
3.2.2	評価1: LongHaulネットワークにおける通信量削減効果	10
3.2.3	評価2: 階層構造ネットワークにおける通信量削減効果	11
3.2.4	評価3: 動画内アクセス偏りと通信量削減効果の関係	11
3.3	議論	12
第4章	分散協調キャッシュのライブ配信への応用	16
4.1	色タグを用いたライブ配信キャッシュ制御	16
4.1.1	色キャッシュによるライブ配信キャッシュ制御の検討	16
4.1.2	データの経過時間に基づいた色タグ制御	16
4.1.3	複数画質のデータ構造に基づくキャッシュ比率調整	17
4.2	評価	18
4.2.1	評価環境	18
4.2.2	実験中の通信量推移の評価	20
4.2.3	合計通信量の内訳	21
4.3	議論	21
第5章	結論	25
	謝辞	26

目次

2.1.1 Zipf 則とガンマ分布による人気動画の偏り	3
3.1.1 キャッシュサーバのチャンク分割とブラウザリクエストの関係	7
3.1.2 チャンクのアクセス偏りに基づいた色キャッシュ制御の例	7
3.2.1 評価対象のバックボーンネットワークトポロジ	8
3.2.2 動画内部のアクセス偏り分布の生成例	10
3.2.3 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 (評価 1)	11
3.2.4 階層化ネットワークでの通信量削減効果	12
3.3.1 動画内部アクセス偏りによる通信量削減効果の変動 (階層なし)	14
3.3.2 動画内部アクセス偏りによる通信量削減効果の変動 (階層あり)	14
3.3.3 チャンク分割の有無によるキャッシュコンテンツの差	15
4.1.1 データの経過時間に基づいた色タグ制御	17
4.1.2 データの経過時間に基づいた階層ネットワーク間でのキャッシュ配置	18
4.1.3 データの経過時間に基づいた階層ネットワーク間でのキャッシュ配置	18
4.2.1 色付けされた 3 階層のリングネットワーク	20
4.2.2 時間経過と合計ユーザ数の関係	21
4.3.1 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 (k=0.5).	23
4.3.2 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 (k=1.5).	23
4.3.3 評価対象ネットワークでの通信量の内訳 (k=0.5).	24
4.3.4 評価対象ネットワークでの通信量の内訳 (k=1.5).	24

表目次

3.1	実験パラメータ	9
3.2	階層構造ネットワークのパラメータ	10
4.1	実験条件	19
4.2	各階層の色数とコンテンツ数の対応	19

第1章 序論

インターネットを介した動画コンテンツによる通信量は急速な増加を続けている。Cisco 社の調査によると、インターネット上の通信量は5年で3倍の速度で増加しており、2022年には動画の通信量が全体の82%を占めると予測されている [1]。一般に、通信量の削減にはキャッシュサーバの利用が有効である。キャッシュサーバは通信経路上に設置され、流通するコンテンツを自身のストレージに複製保存し、キャッシュしたコンテンツへの要求に複製データを返送することで、配信サーバへのデータ取得回数を低減する。

最近では、4K、8K と呼ばれる高品質コンテンツや Virtual Reality (VR) コンテンツの普及によって、コンテンツ1つあたりの動画データサイズは急増しており、インターネット通信量の増大に拍車をかけている。従来のキャッシュサーバではそれぞれが独立して動作するため、ネットワーク中に複数台設置してもほぼ同一のコンテンツがキャッシュされてしまい、大きな通信量削減効果は望めない。そこで、複数のキャッシュサーバを協調して動作させ、通信量削減効果を向上する分散協調キャッシュが検討されている [2]。先行研究では、中島らは色タグ情報に基づく軽量分散協調キャッシュ制御手法（以下、色キャッシュ）を提案した。色キャッシュは、軽量の計算コストで遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) による計算に匹敵する通信量削減効果を示している。一方で、先行研究の色キャッシュは動画を単一ファイルとして取り扱うことを前提としており、最近の VoD (Video on Demand) 配信やライブ配信で用いられることを検討していない。

本論文では、色キャッシュを拡張し、VoD 配信における分割配信とライブ配信の2つの通信効率化に取り組む。前者は、単一の動画でも再生位置によって人気の差があることに着目して、人気の位置を優先的にキャッシュすることで VoD 配信の通信効率化を図る。後者は、配信データが時間経過で人気度が低下することに着目し、新しいデータほどユーザに近い位置でキャッシュすることでライブ配信の通信効率化を図る。

第2章 関連研究

2.1 動画配信サービスの通信量削減

2.1.1 VoD サービスの要求傾向と通信削減効果

限られたキャッシュ領域で効率的に通信量を削減するためには、キャッシュするコンテンツの選定が重要である。ユーザからのリクエストは一部の人気コンテンツに偏っているため、アクセス頻度が高いコンテンツを優先的にキャッシュすることで、効率的に通信量を削減できる。YouTube を対象にした調査によると、動画のアクセス傾向は一部の人気動画に集中する傾向が見られ、動画ライブラリの上位 10% の人気動画がアクセス全体の約 70% を占める [3]。Web 上のアクセス傾向は冪乗則で Web サイトのアクセス傾向が Zipf 則でモデル化されることが多いのに対し、動画のアクセス傾向はより大きな偏りを持つガンマ分布でモデル化することで、より現実の VoD アクセス傾向に近くなることが先の調査で併せて示されている。図 2.1.1 に、Zipf 則とガンマ分布でモデル化した動画のアクセス累積確率分布を示す。モデルにおいても、調査の結果に沿う形で上位コンテンツへとアクセスが集中している。

Netflix 社が各地に配置している自社サービス専用のキャッシュサーバのストレージ容量は 1 台あたり動画ライブラリ全体の 10% 程度であり、このキャッシュサーバ 1 台で最大 70% の通信量を削減できる [4]。しかし、コンテンツの大容量化・高品質化に対してストレージ容量の拡大の進みは遅く、保持可能な動画数の低減による将来的なキャッシュ効率の低減が懸念される。また動画の大容量化の一方で、動画全体を視聴するユーザの割合は全体の 20% と言われており、動画時間が長いほどこの割合が低下する [5][6][7]。通常、動画は先頭から再生するため動画の冒頭はアクセス頻度が高く、後半のエンドロールのような箇所はアクセス頻度が低下する傾向にある。スポーツの得点シーンのようなハイライトシーンなど、動画内の特定箇所にアクセスが集中する場合もあり、動画の再生位置によってアクセス頻度が異なる。しかし、従来のキャッシュ制御では、動画をコンテンツ単位で保持しているため、動画の再生位置によるアクセス頻度の差は考慮されていない。

2.1.2 ライブ配信サービスのアクセス傾向とキャッシュ制御

ライブ配信サービスの YouTube Live と Twitch では、一部の放送に人気偏っており、全体の上位 10% に約 80% のアクセスが集中している [8]。また、ライブ配信の性質上、その配信内での最新の動画データにアクセスが集中する。しかし、物理的なネットワークの距離が原因で転送までに遅延が発生する。ユーザからのリクエストは基本的に最新のデータに集中する一方で、遅延によって最新のデータより多少時間が経過したデータにもアクセスが発生する。タイムシフト視聴や追っかけ再生などの機能を用いて意図的に古いデータを参照するユーザも存在する。Wauters らは、IPTV 配信とタイムシフト視聴に焦点を当て、配信されたデータは時間経過とともに人気低

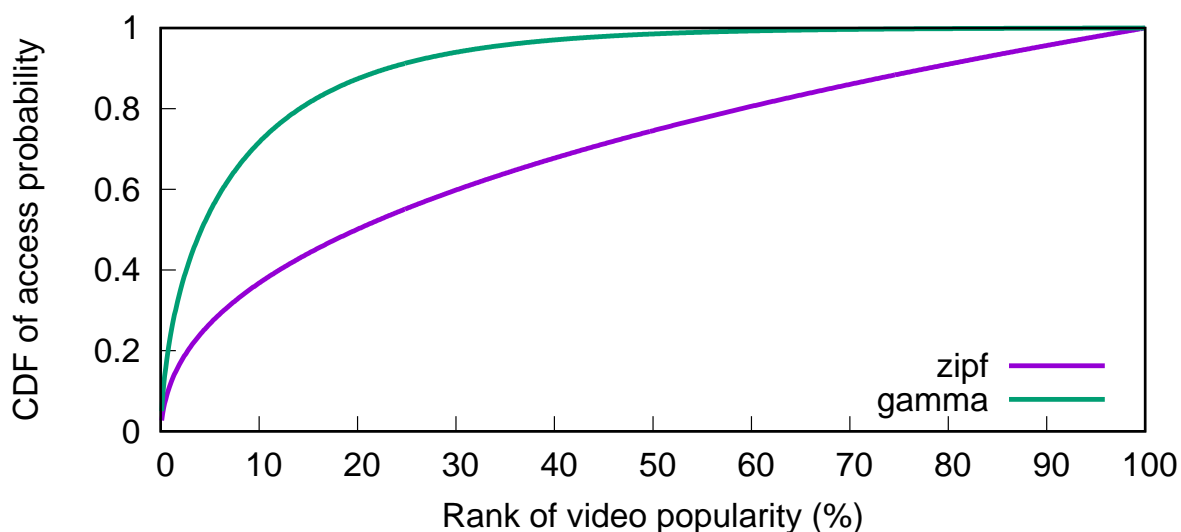


図 2.1.1: Zipf 則とガンマ分布による人気動画の偏り

減する想定のもとにキャッシュ戦略を提案している [9]。人気度とネットワーク距離に基づいて一定間隔でキャッシュ配置を変動させ、人気のコンテンツほどユーザの近くでキャッシュさせる手法により通信量削減効果を示した。Abrahamsson らは、時間経過による人気低減以外に実際の TV スケジュールや統計を用いてシミュレーション評価を行い、人気のデータをユーザの近くの小さいキャッシュ領域でピーク時のリンク負荷を大幅に低減できることを述べている [10]。一方で、これらのキャッシュ制御手法では、分散協調キャッシュへの応用は検討していない。

2.1.3 チャンク分割制御によるコンテンツ配信

オンデマンド配信は、視聴者の都合のよいタイミングであらかじめ用意されている動画コンテンツを視聴することができる方式で、ライブ配信は録画と配信を並行して実施するリアルタイムな配信方式である。最近では、両方の方式で、後述のチャンク分割制御に基づく配信が行われている。

通常のファイルでは、全てのデータをダウンロードし終えてから開く動作が行われるが、音声や動画データはデータサイズが大きくダウンロードを終えるのに時間を要する。そこで、ファイルをダウンロードしながら順次再生することで、データを全てダウンロードせずにコンテンツを視聴することができる。この方式は一般に広義の「ストリーミング」と呼ばれる。最近の動画配信サービスでは、HTTP ベースのストリーミング方式が主流であり、YouTube や Netflix のような VoD サービスから、YouTube Live や Twitch などのライブ配信サービスでも利用されている。HTTP ベースの動画配信方式は、MPEG-DASH 形式と HTTP Live Streaming (HLS) 形式が広く普及している。これらの配信方式では、物理的に複数ファイルに分割された動画ファイルまたは内部構造が論理的に分割ダウンロードできるよう変換された動画ファイルと、動画の部分データ情報が記載されたプレイリストファイルを用いる。動画再生プレイヤーはプレイリストをもとに部分データを逐次取得するが、取得量は動画の再生位置を起点としてバッファ量を上限とするため、再生が途中で中断された場合のそれ以降のダウンロードは発生しない。

部分データの取得の繰り返しによって動画が再生されていることから、城間らはコンテンツの再生位置によってアクセス頻度が異なることに着目し、動画を分割してキャッシュすることで人気の高いシーンを優先的にキャッシュし、通信量が削減されることを示した [11]。一方で、分割された部分データの経路制御や分散協調キャッシュの効率化の余地がある。また、ライブ配信では通信帯域の品質に応じて動画品質を最適化するアダプティブストリーミングの機能が存在する。現在利用されているアダプティブストリーミングでは、同一の動画を複数品質それぞれ用意しているため、品質分だけ動画ファイル数が増えてしまい、非効率的である。これは動画をレイヤ構造で品質調整をする Scalable Video Coding (SVC) によって解決できるよう研究がなされている [12][13]。SVC は、ベースとなる低品質だが軽量なレイヤを確実にユーザに配信することで動画が停止するリスクを低減し、十分なネットワーク帯域幅が確保できた場合にレイヤを重ねることで品質を向上させる技術である。

2.2 動画配信ネットワークのキャッシュ制御手法

2.2.1 単一サーバにおけるキャッシュ制御

キャッシュ領域には限りがあるため、アクセス頻度の高いコンテンツを優先的にキャッシュする仕組みが必要である。Least Frequently Used (LFU) アルゴリズムは、アクセス頻度を記録し、新しくコンテンツが追加される際にアクセス頻度の低いものからキャッシュ領域から追い出す方式である。アクセス頻度の高いものがキャッシュされるため、アクセス傾向が変化しない状況下ではキャッシュヒット率が高く、通信量削減効果大きい。しかし、動画のアクセス傾向は1時間で40-60%程度変動するうえ [14]、一部のコンテンツに急激なアクセス集中などが発生した場合、LFU ではキャッシュに残りづらく、アクセス変動に追従できない。Least Recently Used (LRU) アルゴリズムは、最後にアクセスされた時間を記録し、アクセスされていない期間が最も長いデータを追い出す方式である。最近アクセスされたものがキャッシュされるため、アクセス傾向の変動に追従しやすく、急激なアクセス集中などにおいても配信サーバへのアクセス負荷を低減できる。一方で、アクセス頻度を考慮しないため LFU と比較するとキャッシュヒット率が低く、LFU の通信量削減効果には及ばない。

2.2.2 複数のサーバを組み合わせる分散協調キャッシュ制御

総コンテンツ数やコンテンツ1つあたりのデータサイズの増大によって、限られたキャッシュ領域は圧迫されて従来よりも効果が低減する。さらに、前述の LFU や LRU のようなキャッシュアルゴリズムが採用されたキャッシュサーバでは、それぞれ独立して動作するため、複数台配置しても人気のコンテンツが随所で重複して保持されてしまい大きな通信量の削減効果向上は望めない。そのため、複数のキャッシュサーバを協調動作させ、それぞれ異なるコンテンツを保持して実効キャッシュ容量を拡大する、分散協調キャッシュが提案されている [2][15][16][17]。Wang らは、キャッシュサーバとコンテンツにそれぞれ ID を割り当て、その ID の比較でキャッシュ規則を決定した [15]。しかし、特定のコンテンツに人気が集まった場合、対応する ID のサーバやサーバ周辺の経路に負荷が集中する。Li らはこの手法を拡張し、サーバをグループ分けすることで、ユーザとコンテンツ間の最大ホップ数を制限する手法を検討した [16]。大手 CDN 事業者の Akamai は、拠点内のキャッシュサーバ ID とコンテンツ ID を比較し、実効キャッシュ容量の拡大と負荷分散

を図っている。一方で、AkamaiのCDNは拠点間の協調動作をしていないため、実効キャッシュ容量の拡大に制限が掛かる。WangらとLiらの手法は異なる拠点との協調を可能とするが、依然として人気コンテンツへのアクセス集中によって負荷分散が失われる可能性がある。

Liらはあらかじめ定めたネットワーク制約下において、アクセス頻度に基づいた最小限の通信量を達成するように、キャッシュ配置のための最適化アルゴリズムを示した[17]。キャッシュサーバ間の負荷が均衡し、全体の通信量が最小限になるコンテンツ配置を遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて計算する。しかし、GAの計算には10台の計算機クラスタを利用して10時間以上の計算時間を要する一方で、VoDのアクセス傾向は1時間で40-60%程度変動するため[14]、過去のアクセス傾向に基づいて計算されたコンテンツ配置では最適な通信量削減効果が期待できない。中島らは、GA計算による通信量削減効果に近いコンテンツ配置を、軽量なアルゴリズムで実現する色キャッシュを提案した[2]。色キャッシュでは、まずコンテンツとサーバに色と呼ばれるビット情報で制御されるタグ(以下、色タグ)が割り振られ、各キャッシュサーバは自身の色タグとマッチするコンテンツのみを保持する。異なる色をそれぞれコンテンツに割り振ることで、コンテンツを各サーバへ排他的に保持させることができ、実効キャッシュ容量を拡大できる。またアクセス頻度の高いコンテンツに多色割り当てることで各サーバに重複保持させ負荷が集中しないよう調整できる。一方で、中島らの色キャッシュでは、チャンク分割制御やライブ配信に利用することを検討していない。

第3章 分散協調キャッシュのVoD配信への応用

3.1 色キャッシュを組み合わせたチャンク分割制御

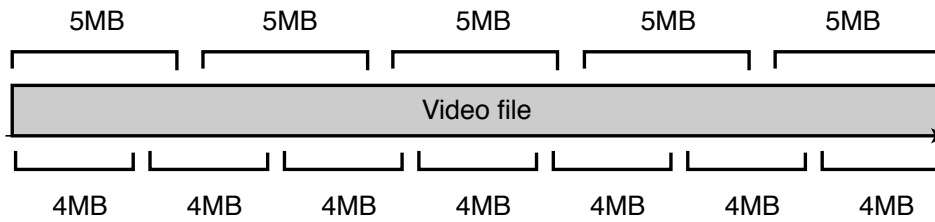
3.1.1 チャンク分割キャッシュ制御

本章では、チャンク分割と色キャッシュを組み合わせた制御手法の提案をする。2.1.1 で述べたように動画の再生位置によってアクセス頻度に差があることから、動画内のアクセス頻度が高い箇所を優先してキャッシュすることが望ましい。MPEG-DASH/HLS 形式の動画は、ブラウザが視聴範囲を指定したリクエストを生成し、取得した部分データをプレイヤー側で結合しながら再生する。リクエストされる範囲は、動画や再生位置によって異なるため、取得バイト数は一定ではない。そこで、キャッシュサーバ側でファイルを分割して制御することで、配信側の分割仕様に依存することなくキャッシュ制御を行う。具体的には、動画を複数の分割データ（以下、チャンク）に分割して、チャンク単位での人気順に基づき、アクセス頻度が高いものを優先的に保持するよう制御を行う。図 3.1.1 を例に示す。(A) 側ではキャッシュサーバ側が単一の動画ファイルを 5MB ずつに分割して保存していることを示し、(B) 側ではプレイヤー側が 4MB ずつ視聴範囲をリクエストすることを示す。リクエストが複数のチャンクにまたがる場合、必要なチャンクを取得してキャッシュし、要求されたバイト範囲のみ返答する。プレイヤーが 12MB 分の 3 つのチャンクを要求したとき、キャッシュサーバは 15MB 分の 3 つのチャンクをオリジンサーバから取得してキャッシュし、12MB 分のデータをプレイヤーに返答する。

3.1.2 色キャッシュ制御

先行研究の色キャッシュでは、人気順にソートされた動画コンテンツに対して、「動画コンテンツ」単位で色タグを付与する。一方、本論文における提案手法では、動画は一定サイズのチャンクに分割されているものとし、動画内部のアクセス頻度に応じてチャンク単位での人気順のランキング表を生成する。人気順にソートされたチャンクに対して、「チャンク」単位で色タグを付与することで、動画の人気部分が優先的にキャッシュされ、一方で不人気なものは排除されるため、キャッシュ領域を効率的に活用できる。図 3.1.2 に、チャンク単位で色タグが割り振られる制御例を示す。各キャッシュサーバには、それぞれ単色の色タグを設定され、各チャンクには単一または複数の色が割り当てられる。キャッシュサーバは自身の持つ色と同一の色が設定されているチャンクのみをキャッシュする。例えば図中では、Red, Green, Blue の 3 色の色タグが用意され、Red の色タグが割り当てられたキャッシュサーバは、Red の色タグが割り当てられているチャンクのみをキャッシュする。Low の段の 3 つの各動画チャンクは異なる 1 色のタグが付与されているため、それぞれが各キャッシュサーバに排他的に保持される。色に基づいて排他的にチャンクを保持することで、実効キャッシュ容量を拡大でき、ネットワーク外部へ流れる通信量を低減できる。また、人気のチャンクに複数の色を付与することで、キャッシュヒット率の向上とサーバ間の負

(A) Cache servers store video files by splitting it to 5MB chunks.



(B) Video player fetches 4MB chunks according to browser.

図 3.1.1: キャッシュサーバのチャンク分割とブラウザリクエストの関係

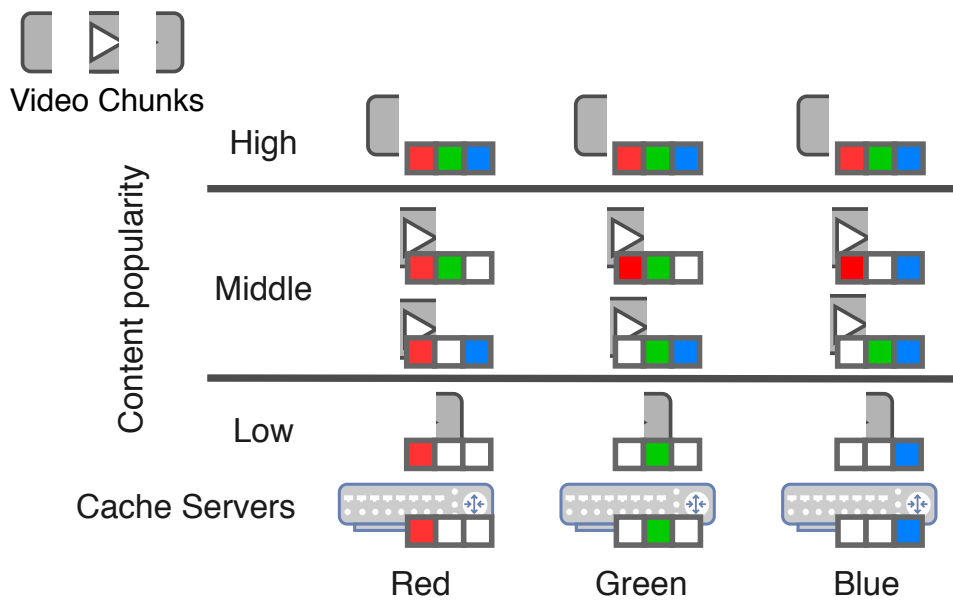


図 3.1.2: チャンクのアクセス偏りに基づいた色キャッシュ制御の例

荷分散が期待できる。High, Middle, Low の各段はチャンクの人気度を示しており、High の段のチャンクは全ての色が割り当てられているため、全てのキャッシュサーバで重複して保持される。同様に Middle の段のチャンクは2色のタグが割り当てられているので、2台のキャッシュサーバで重複保持される。色タグ数が多いほど細かい人気度のグループ化が可能であり、色タグの付与の仕方によって各チャンクの重複と分散具合を調整できる。また、ネットワークが複数の階層によって構成されている場合、各階層で異なる色タグのセットを用意することで、各階層で異なるコンテンツを保持するよう協調動作が可能である。

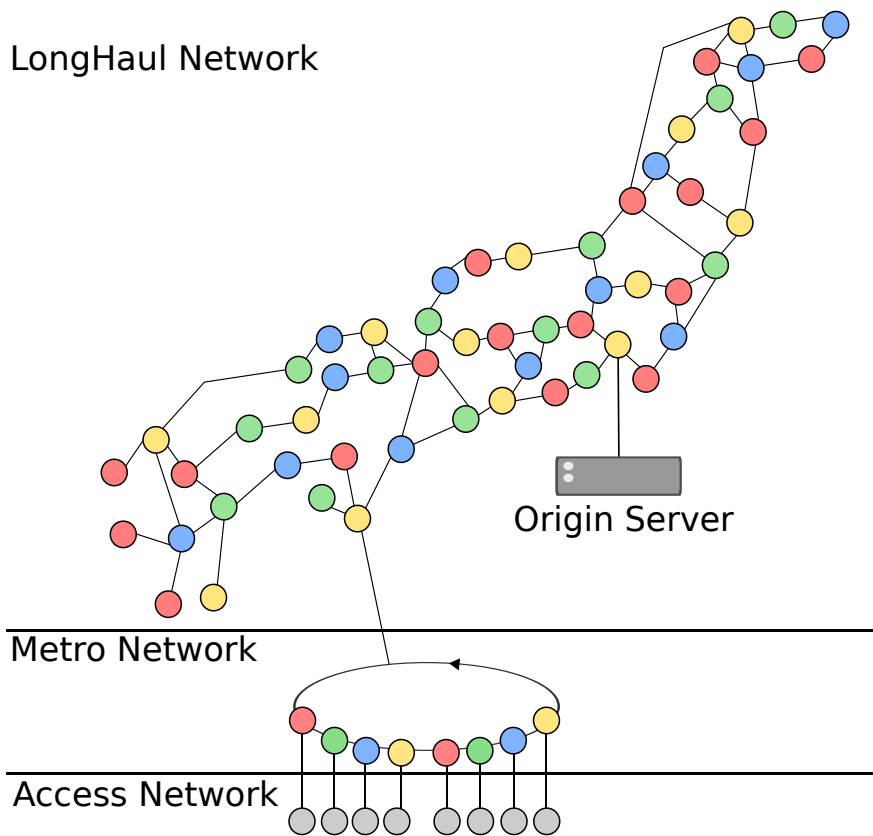


図 3.2.1: 評価対象のバックボーンネットワークトポロジ

3.2 評価

3.2.1 評価条件

評価は作成したシミュレーションプログラムを利用して3段階に分けて実施する。実験に利用する各パラメータを表 3.1 に、ネットワークトポロジを図 3.2.1 に示す。ネットワークは LongHaul, Metro, Access の3階層で構成されている。LongHaul は日本の NTT のバックボーンネットワークを模した構造をしており、55 ノードのキャッシュサーバで構成される。Metro は8 ノードのキャッシュサーバによる単方向リングネットワークで構成され、Access はキャッシュサーバを単一ノードで設置する。LongHaul ネットワーク上の各キャッシュサーバには Metro ネットワークが接続され、また Metro ネットワーク上の各キャッシュサーバには Access ネットワークが接続される。オリジンサーバは LongHaul ネットワーク上の東京を想定したノードに1つ設置する。対象のネットワークトポロジを用いて、アクセス確率とホップ数から通信量を算出し、チャンク分割の有無による通信量を比較する。

評価1では、ネットワークトポロジのうちの LongHaul ネットワークのみを用いて通信量評価を行う。各キャッシュサーバのキャッシュ容量は Netflix[4] を参考に動画ライブラリ全体の10%とする。各動画の容量は一律のものとして扱い、動画総数は1000個とする。そして、チャンク分割の評価では1つの動画を100個のチャンクに分割してキャッシュする。すなわち、全体の10%の100個の動画を保持できるキャッシュサーバは、10000個のチャンクを保持する。動画へのリクエスト

は YouTube のアクセス傾向に近いガンマ分布に従って生成する [3]。動画の再生位置によるアクセス傾向は、詳細な調査が実施されていないため、「動画内チャンクの人気上位 $N\%$ に $x\%$ のアクセスが集中しているとき」を想定した分布を作成する。アクセス分布の生成例を図 3.2.2 に示す。 N は 10% から 40%、 x は 10% から 90% の 10% 刻みとする。具体的には上位の 10% のチャンクに 10% のアクセスが集中しているときの分布から N と x の値を 10% ずつ変動させていき、上位 40% のチャンクに 90% のアクセスが集中する分布までの 36 通りを作成する。図中の (a) は上位 10% のチャンクに 90% のアクセスが集中しているときの分布 ($N=10, x=90$) を示し、同様に (b) は上位 20% のチャンクに 90% のアクセスが集中しているときの分布 ($N=20, x=90$) を示している。評価 1 では、(c) の動画チャンク上位 10% が全体の 50% のアクセスを占めるアクセス傾向の分布 ($N=10, x=50$) を利用する。作成したアクセス傾向に基づいて、各ノードからリクエストを発行する。色キャッシュに用いる色数は 4, 8, 16 色でそれぞれ評価を行う。各サーバへの彩色は、文献 [2] で提案されている改変版の Welsh-Powell アルゴリズムを用いて、隣接するノードの色が隣り合わず、色が分散して彩色されるようにする。各コンテンツ (チャンク) への彩色は、チャンク分割を想定しない色キャッシュにおける動画への彩色アルゴリズムを利用した。

評価 2 では、図 3.2.1 に示す LongHaul, Metro, Access で構成される 3 階層のネットワークトポロジで通信量評価を行う。実際のネットワークでは階層が複数に分かれており、下層のユーザに近いキャッシュサーバでアクセス頻度の高いコンテンツをキャッシュすることで、上層の通信量を削減するためである。上層の LongHaul は評価 1 と同様に 55 ノードのメッシュネットワーク [18]、中層の Metro は 8 ノードの単方向リングネットワーク [19]、下層の Access ネットワークは Metro の各ノードに対して 1 つずつ接続されるノードである [20]。キャッシュ容量は、LongHaul が動画ライブラリ全体の 10%、Metro, Access はそれぞれ 2% とする。アクセス傾向は評価 1 と同様だが、リクエストは最下層ネットワークの Access ネットワークの各ノードから発行する。LongHaul は評価 1 と同様に 4, 8, 16 色でそれぞれで評価するが、Metro は 4 色で固定、Access は単一ノードのため人気上位のチャンクを容量分だけ保持する。評価 1 から追加された階層構造ネットワークのパラメータを表 3.2 に示す。

評価 3 では、動画内のアクセス傾向が極端な偏りを持つ場合や偏りが小さいときなどの複数のアクセス分布を利用して、偏りと通信量の関係性を評価する。前述の作成した 36 通りアクセス分布を用いてチャンクに色を彩色し、通信量を評価する。

表 3.1: 実験パラメータ

コンテンツ数	1000
チャンク分割数 / コンテンツ	100
キャッシュ容量 (保持チャンク数)	100 (10000)
動画アクセスの偏り	ガンマ分布 [3]
パラメータ k	0.475
パラメータ θ	170.6067
トポロジ	バックボーンネットワーク [18]
ノード数	55
色数	4, 8, 16

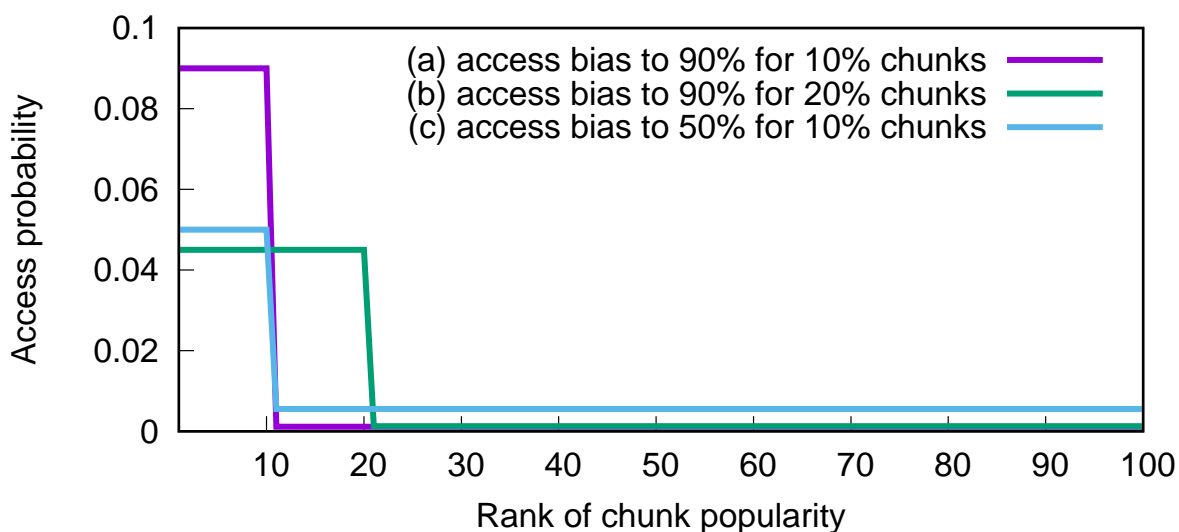


図 3.2.2: 動画内部のアクセス偏り分布の生成例

3.2.2 評価 1: LongHaul ネットワークにおける通信量削減効果

図 3.2.1 の LongHaul Network を対象に，チャンク分割と色キャッシュの併用によって削減される通信量を評価した．キャッシュ無し (w/o)，通常の色キャッシュ (4, 8, 16 色)，チャンク分割をした色キャッシュ (4, 8, 16 色) の通信量を図 3.2.3 に示す．図中の external traffic はオリジンサーバと LongHaul Network の接続リンクの通信量を示し，internal traffic は LongHaul Network 内の 55 台のキャッシュサーバ間の通信量を示す．4 色キャッシュではチャンク分割によって，external が約 23%，internal が約 26% の通信量が削減されている．また，external と internal の合計通信総量では約 25% の通信量削減効果が確認できる．通常の色キャッシュでは色数の増加につれて，より GA に近い精度のキャッシュ配置が可能になるため，通信量削減効果が向上する．チャンク分割をした色キャッシュでも同様に，色数の増加につれて通信量削減効果の向上が確認できる．そして，色数が増えた際もチャンク分割によって通常の色キャッシュよりもさらなる通信量削減効果が確認できる．8 色キャッシュでは，external が約 21%，internal が約 26%，通信総量は約 26% の通信量が削減されている．16 色キャッシュでは，external が約 28%，internal が約 26%，通信総量は約 26% の通信量が削減された．

表 3.2: 階層構造ネットワークのパラメータ

	Access	Metro	Long Haul
トポロジ	直線	単方向リング	メッシュ
ノード数	440	440	55
キャッシュ容量	2%	2%	10%

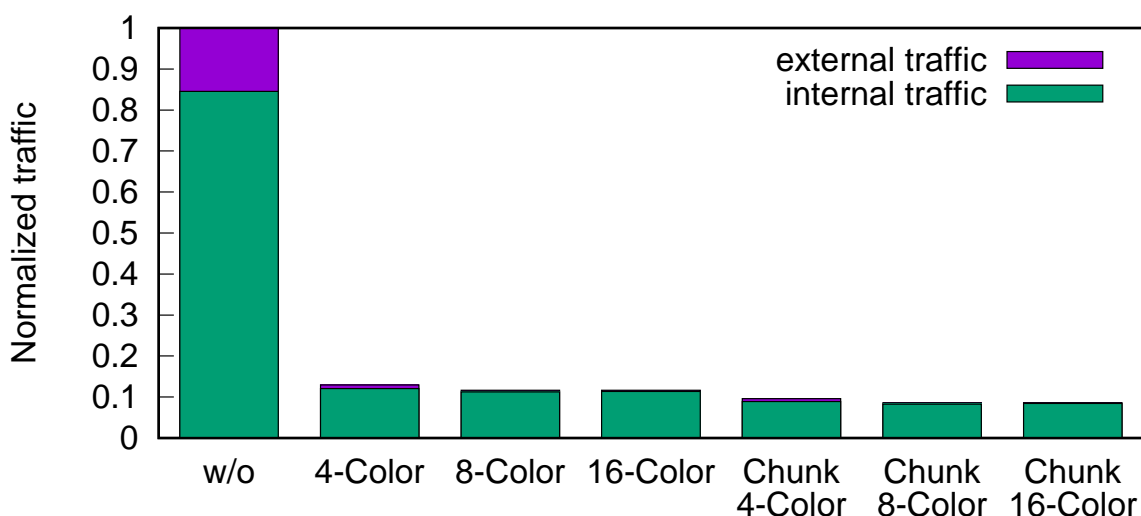


図 3.2.3: 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 (評価 1)

3.2.3 評価 2: 階層構造ネットワークにおける通信量削減効果

図 3.2.1 の 3 階層構造ネットワークを対象にチャンク分割をした色キャッシュによる通信量削減効果の評価した。図中の Origin はオリジンサーバに到達した通信量を示し，その他の LongHaul, Metro, Access はそれぞれのネットワーク内のキャッシュサーバ間通信量を示す。4 色キャッシュでは，階層ネットワーク全体と比較すると，チャンク分割により約 23%の通信量削減効果が確認できる。LongHaul では，約 42%，Metro と Access ではそれぞれ約 22%の通信量が削減された。8, 16 色キャッシュでは，階層ネットワーク全体でそれぞれ約 23%，LongHaul ではそれぞれ約 43%の通信量が削減された。Metro, Access の実験設定は LongHaul の設定によらず一定のため，評価における通信量は一定である。しかし，チャンク分割により人気コンテンツがキャッシュされているのに関わらず，Metro や Access でも同様に通信量が削減されていることから，チャンク分割と分散協調キャッシュの高いシナジー効果が伺える。

3.2.4 評価 3: 動画内アクセス偏りと通信量削減効果の関係

評価 1 と 2 を踏まえ，作成した 36 通りのアクセス分布を用いて動画内のアクセス傾向と通信量との関係性を評価した。動画内部のアクセス偏りと通信量削減効果の変動を図 3.3.1 と図 3.3.2 に示す。それぞれ LongHaul のみを対象にした階層構造なしの通信量と 3 階層ネットワークを対象にした通信量を表している。グラフの縦軸は通常の色キャッシュの通信量を 1 としたときの削減率を示し，横軸は「動画内チャンクの人気上位 $N\%$ に $x\%$ のアクセスが集中しているとき」の x を示す。チャンク分割による効率化はチャンク間でアクセス頻度に差があるときに働くため，チャンク間でアクセス頻度に差がない場合は分割の有無による通信量の差は発生しない。

LongHaul のみを対象にした図 3.3.1 から，最も偏りの大きい分布（図中の紫の折れ線グラフの横軸 0.9）のとき最大約 79%の通信量削減効果が確認できる。3 階層構造を対象にした図 3.3.2 からは，最も偏りの大きい分布のとき最大約 70%の通信量削減効果が確認できる。

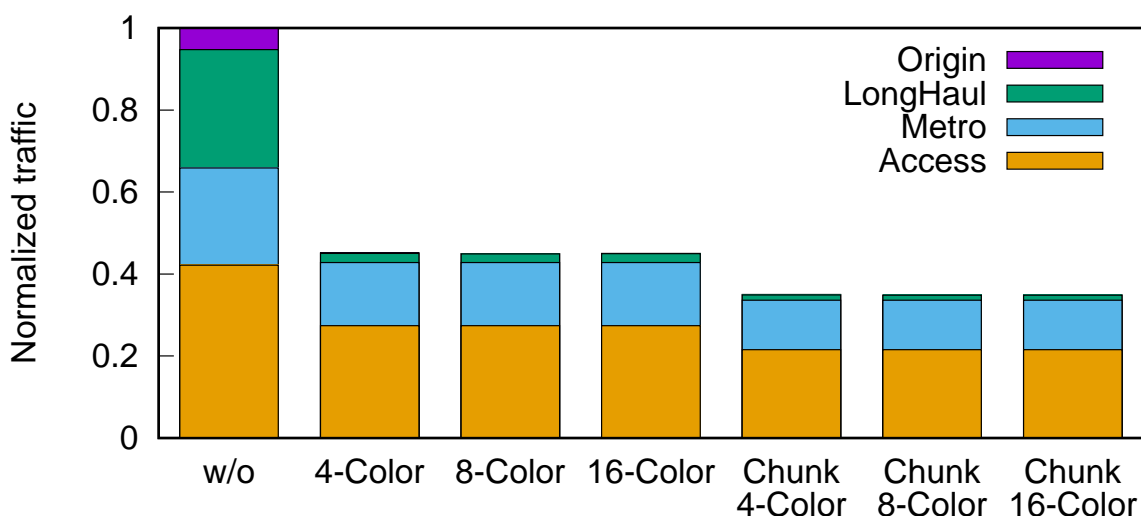


図 3.2.4: 階層化ネットワークでの通信量削減効果

LongHaul を対象にした際、 N が 10% で x が 90% のとき約 79% の通信量削減効果を示しているのに対して、 x が 50% のときは約 26% の通信量削減効果に留まる。このとき、チャンク分割を行わない場合を基準として、分割により新たにキャッシュされるチャンク内訳を図 3.3.3 に示す。偏りの大きい x が 90% のとき、チャンク分割によって新しく 2 割のコンテンツがキャッシュされ、 x が 50% のときは新しく 1 割のコンテンツがキャッシュされていることがわかる。全体の 8-9 割は分割の前後でキャッシュ内容が変化しておらず、これは動画コンテンツに対するアクセス傾向のガンマ分布が既に大きな偏りを持っているため、低人気動画の高アクセス頻度のチャンクより、高人気動画の低アクセス頻度のチャンクのほうが人気順位が上である場合が多いためである。また、新しいコンテンツがキャッシュされずとも通信量の削減効果が確認できるのは、従来からキャッシュされていたコンテンツのチャンク単位での順位が変動しているためである。

階層構造ネットワークを対象にした際は、 N が 10% で x が 90% のとき約 67% の通信量削減効果を示し、 x が 50% のときは約 22% の通信量削減効果を示す。LongHaul 単体より削減量が少ないが、これは下層でのチャンク分割や分散協調により、LongHaul へ向かう要求の偏りが比較的緩やかになるためである。

3.3 議論

色キャッシュとチャンク分割を組み合わせることによって、サーバ側の機材投資や配信側にコストをかけることなく、通信量削減効果の向上が確認できた。評価では、LongHaul のみを対象にした場合より階層型のネットワークを対象にした場合のほうが、高い通信量削減効果が示された。チャンク単位のアクセス頻度を考慮したことで、下層のキャッシュヒット率が向上し、上層に流れる通信が低減したためである。

今回の評価では、コンテンツ容量を一律に設定して 100 分割する実験条件だったが、実際のネットワークでは分割数が増大するほど通信するファイル数が増大するため、転送のオーバーヘッドが生じる。通信量削減効果と転送のオーバーヘッドのトレードオフを考慮した効率的なチャンク

分割数はさらなる調査が必要である.

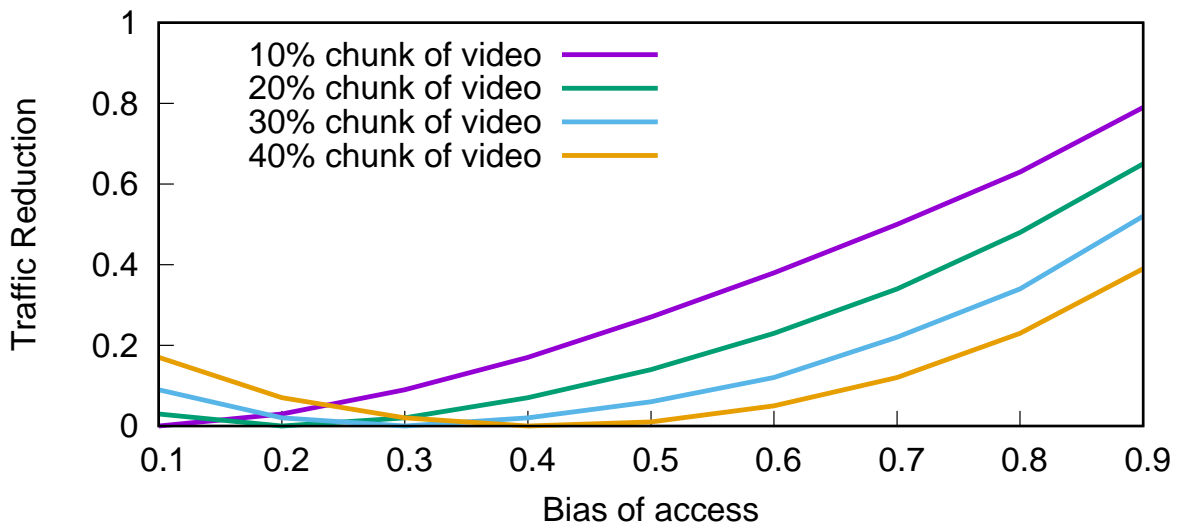


図 3.3.1: 動画内部アクセス偏りによる通信量削減効果の変動 (階層なし)

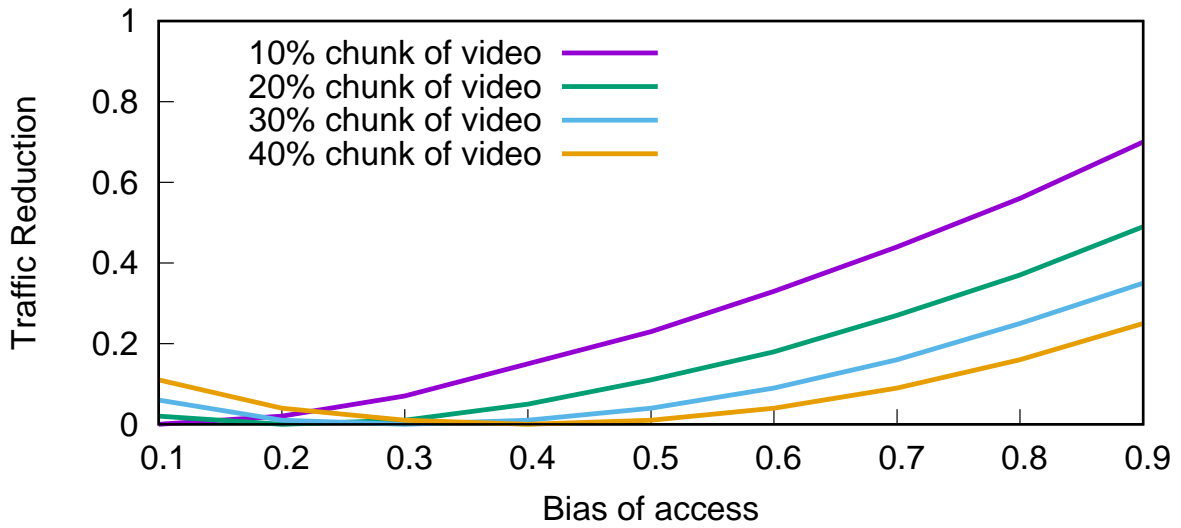


図 3.3.2: 動画内部アクセス偏りによる通信量削減効果の変動 (階層あり)

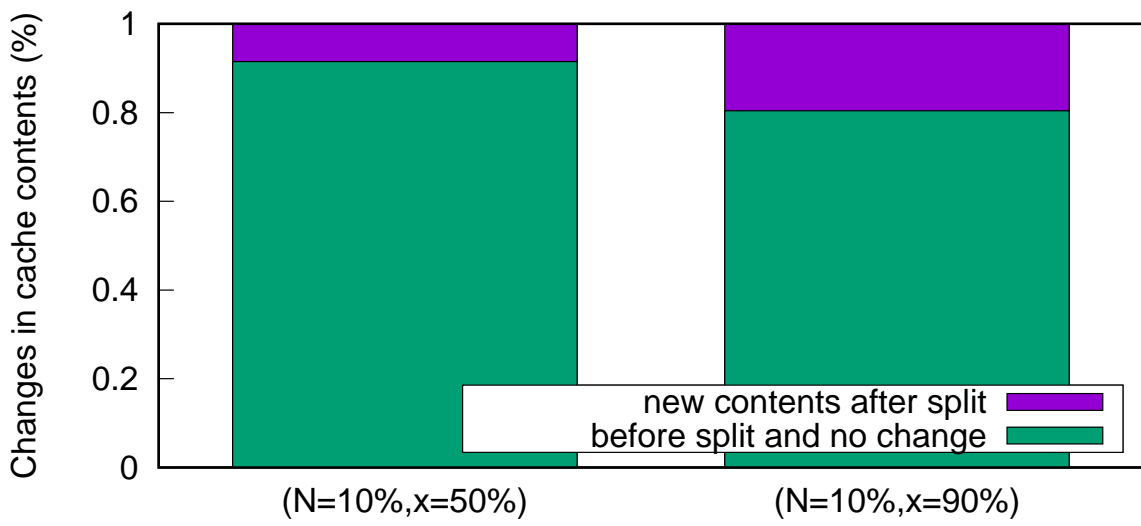


図 3.3.3: チャンク分割の有無によるキャッシュコンテンツの差

第4章 分散協調キャッシュのライブ配信への応用

4.1 色タグを用いたライブ配信キャッシュ制御

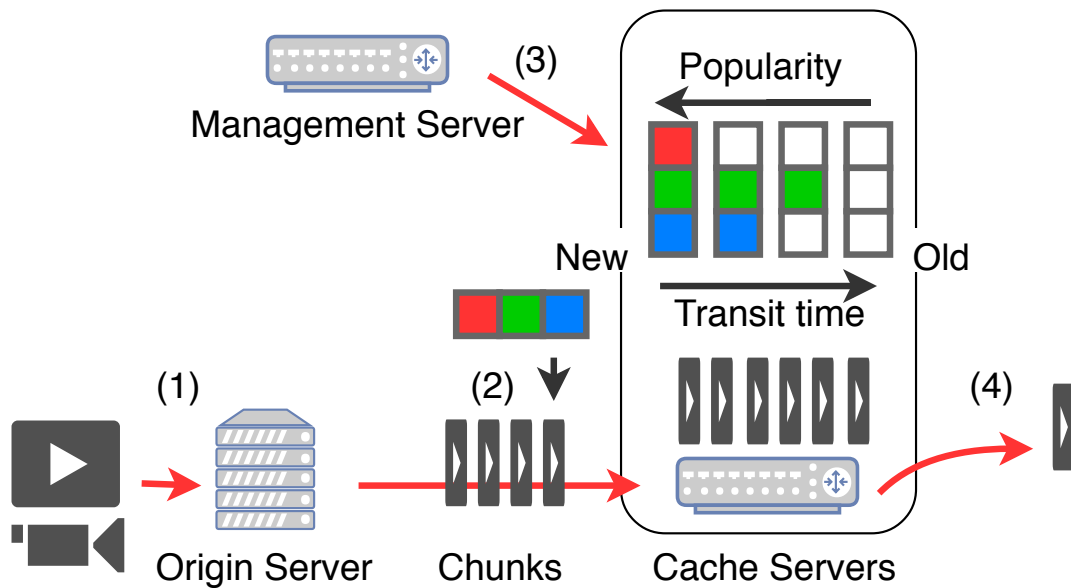
4.1.1 色キャッシュによるライブ配信キャッシュ制御の検討

従来の分散協調キャッシュ手法および先行研究の色キャッシュはライブ配信に利用することを検討していない。本章では、色キャッシュをタイムシフト視聴を考慮してライブ配信向けに拡張する。具体的には、ライブ配信データの時間経過とアクセス頻度の関係性に基づいたコンテンツ配置制御手法を提案する。

2.1.2 で示したように、ライブ配信は基本的に最新のデータにアクセスが集中し、時間経過とともにアクセス頻度が低下する。また、最近のライブ配信データは VoD と同様 MPEG-DASH/HLS 形式によって配信されており、3.1.1 と同様にチャンクベースで制御することで、人気の箇所をキャッシュするよう制御が可能となる。3 章と同様に各キャッシュサーバにそれぞれ単色の色を割り振り、動画チャンクには単一または複数の色を割り当てる。一方で、VoD 配信と異なりライブ配信は常に新規コンテンツ（チャンク）が追加される状態にあり、アクセス傾向をリクエスト回数などから集計してからチャンクの色タグを設定しては、重要な最新のデータをキャッシュすることができない。

4.1.2 データの経過時間に基づいた色タグ制御

VoD での色キャッシュでは、アクセス頻度に基づいてコンテンツの色タグを決定する。ライブ配信におけるアクセス頻度は前述のとおり最新のデータが重要だが、最新のデータには色タグが付与されていないため、サーバにキャッシュされない。そこで、データの経過時間を考慮したアクセス傾向を想定し、ライブ配信のチャンク生成からの経過時間と色タグを関連づけた表を作成する。データ経過時間に基づいた色タグ制御の基本的な動作を図 4.1.1 に示す。図では、新しいチャンクほどアクセス頻度が高く、古くなるほど頻度が低減する経過時間と色タグの関連表のもと、それぞれのチャンクが時間経過とともに少ない色タグ数に更新される動作を示している。ネットワーク上には配信サーバとキャッシュサーバの他、色タグ情報を管理するサーバ（以下、色管理サーバ）が配置される。キャッシュサーバは配信されたデータの色タグと自身の持つ色タグとがマッチすれば自身のストレージに保存する。色管理サーバはデータの経過時間と色タグの関連表と、各サーバのキャッシュ容量を元にチャンクの色情報を更新および管理する。各キャッシュサーバに保存されているチャンクデータの色情報は定期的に色管理サーバによって更新される。以上の 3 種類のサーバを踏まえ、データの経過時間に基づいたキャッシュ制御の流れを説明する。まず録画機材で撮影されエンコード処理によって生成されたライブ配信データは、配信サーバから配信される前にあらかじめ複数の色を付与することで、人気のチャンクとして複数のサーバに重複してキャッシュされる。各キャッシュサーバに保存されたチャンクデータは、定期的に色管理サー



- (1) Record and encode a live video.
- (2) Assign the color tags to new chunks to be cached.
- (3) Update the color tags by elapsed time.
- (4) Remove the oldest chunk from the cache.

図 4.1.1: データの経過時間に基づいた色タグ制御

バによって保持する色情報が更新される。チャンクデータは時間経過とともに古くなるほど色数を減らして分散してキャッシュされ、最終的にキャッシュ領域から追い出される。あらかじめ色を複数色付与し、新しいものほど色数を多くする色タグの関連表によって、人気の最新チャンクは複数のサーバに保持されるため、負荷分散効果とキャッシュヒット率が向上する。同時に色タグの分散協調によるアプローチで実効キャッシュ容量が増大し、より長い期間のタイムシフト視聴にキャッシュから応答でき、配信サーバへの通信量が削減できる。

図 4.1.2 に複数階層ネットワークにおけるデータの経過時間とキャッシュ配置の関係を示す。図のような Edge, Metro, LongHaul の 3 階層で構成されるネットワークの場合、各階層で異なる色タグのセットを利用する。配信から間もない新しいデータはユーザに近い Edge ネットワークでキャッシュされるよう色タグが付与され、時間経過とともに古くなったデータはユーザから遠い位置に配置されるよう色タグが制御される。

4.1.3 複数画質のデータ構造に基づくキャッシュ比率調整

2 章で述べたように、ストリーミング配信には複数画質を動的に切り替える機能を有している。各画質層それぞれを色タグ制御することで、各画質層のキャッシュ比率を調整できる。図 4.1.3 では Edge, Metro, LongHaul の 3 階層構造で構成されたネットワークにおいて、SVC による 3 つの

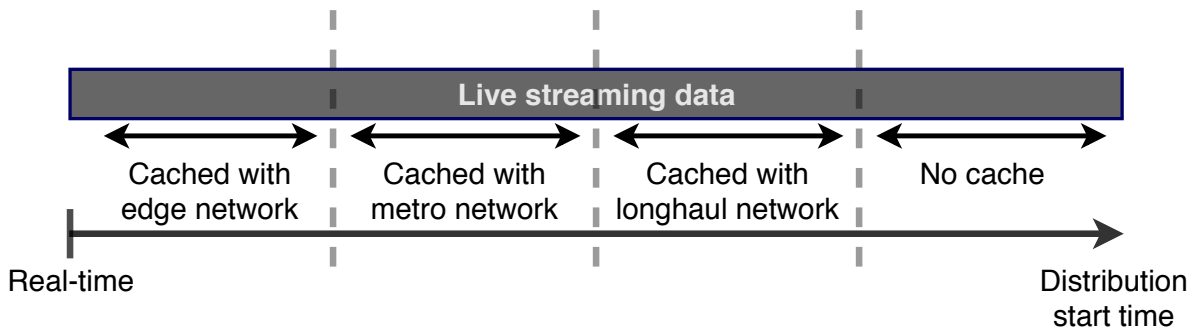


図 4.1.2: データの経過時間に基づいた階層ネットワーク間でのキャッシュ配置

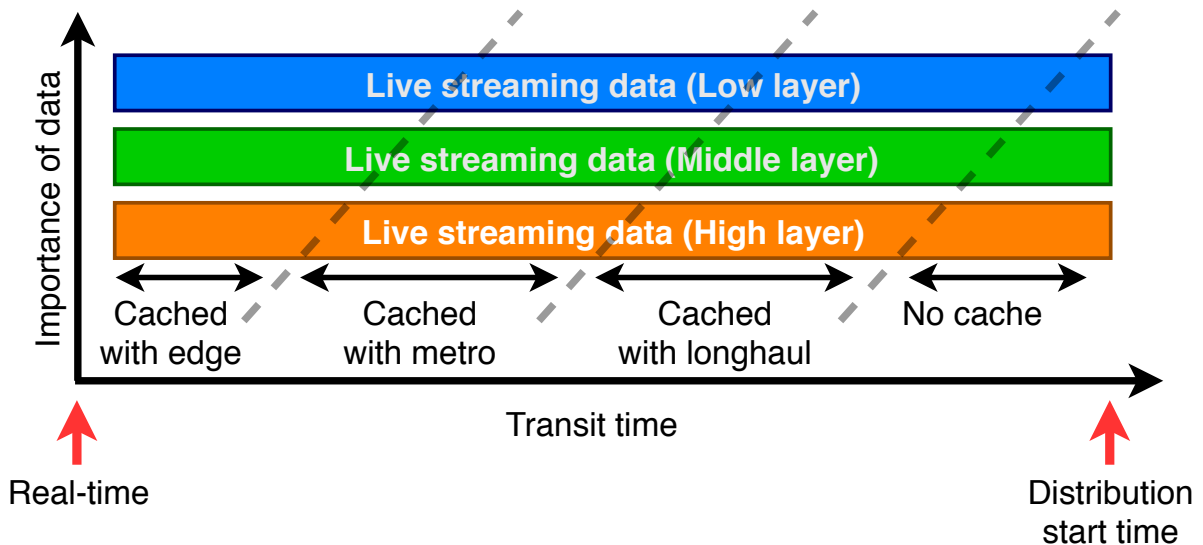


図 4.1.3: データの経過時間に基づいた階層ネットワーク間でのキャッシュ配置

画質層をそれぞれ制御する例を示している。図の青棒で示されている Low Layer は SVC におけるベースレイヤを示しており、そこに Middle Layer と High Layer を重ねることで品質を調整する。全てのレイヤーを含めた状態が元の動画データであり、ネットワークの帯域やクライアントの要求に合わせ品質を調整したデータを配信する。図中に斜めに書かれた点線は、各画質のキャッシュ割合を調整できることを示し、図では多くの Low Layer をキャッシュすることを示す。割合を調整した後、各データの経過時間から色タグが設定され、データの配置される場所を決定する。

4.2 評価

4.2.1 評価環境

図 4.1.2 で示した単一の画質層を対象に評価を行った。実験に利用する各パラメータを表 4.1 に示す。図 4.2.1 に示す 3 階層構造のリングネットワークトポロジを対象に、1000 秒間リクエストを

発生させて通信量を評価する。実験ネットワークは、配信サーバに4ノードのリングネットワークが接続され、それぞれのノードにさらに4ノードのリングネットワークが接続される。レイヤー1から3までそれぞれ4, 16, 64ノード存在し、各階層でキャッシュするコンテンツを排他的にできるように、それぞれの階層で異なる4色の色タグを各ノードに設定する。そして、レイヤー3の各ノードにそれぞれユーザを配置し、リクエストを発生させる。ユーザは時間経過とともに人数を増加させていき、配置された時点から追っかけ再生を行う。すなわち、配信開始から N 秒経過したときに追加されたユーザは、最新のデータから N 秒前のデータ（データの経過時間が N ）を参照する。一度配置されたユーザは、そのノードに滞在し、毎秒ごとに経過時間 N 秒のデータを参照しつづける。ユーザの追加はガンマ分布に基づいた偏りを用いて、最新のデータに集中し、古いデータほどリクエストが少なくなるように各ノードに追加配置される。偏り分布は2種類用意し、 $k=0.5$ の最新データに集中する急な偏りと、 $k=1.5$ の古いデータにも比較的リクエストが分散するような偏りを利用する。各ノードのユーザ数はノード毎に最大1000人になるまで追加される。経過時間と合計ユーザ数の関係を図4.2.2に示す。 $k=0.5$ のときは実験開始から100秒時点で合計約650人のユーザ数にまで増加し、約390秒時点で最大の1000人に到達する。ユーザ数の増加速度が早く、最新に近いデータを参照するユーザが多く占める。 $k=1.5$ のときは実験開始から100秒時点では合計約250人程度であり、約580秒時点で最大の1000人に到達する。ユーザの増加速度は緩やかで、比較的リクエストが分散するようにユーザが追加される。配信データは単一面質のデータを1秒ごとに分割して配信し、キャッシュ容量はノード毎に50秒分のデータを保持できるように設定する。色キャッシュでは各階層で4台のリングネットワークを構築するため、同一階層で直近

表 4.1: 実験条件

配信時間 (sec)	1000
キャッシュ容量 (sec)	50
チャンクサイズ (sec)	1
最大ユーザ数 / ノード	1000
アクセス分布	ガンマ分布 [3]
パラメータ k	0.5, 1.5
パラメータ θ	170.6067
トポロジ	3階層リングネットワーク
ノード数 (階層 1-3)	4, 16, 64
色数 / 階層	4

表 4.2: 各階層の色数とコンテンツ数の対応

	Layer 1 (4, 3, 2, 1色)	Layer 2 (4, 3, 2, 1色)	Layer 3 (4, 3, 2, 1色)
$k=0.5$ (個)	0, 0, 0, 200	0, 50, 0, 50	50, 0, 0, 0
$k=1.5$ (個)	0, 0, 0, 200	0, 0, 50, 150	0, 50, 0, 50

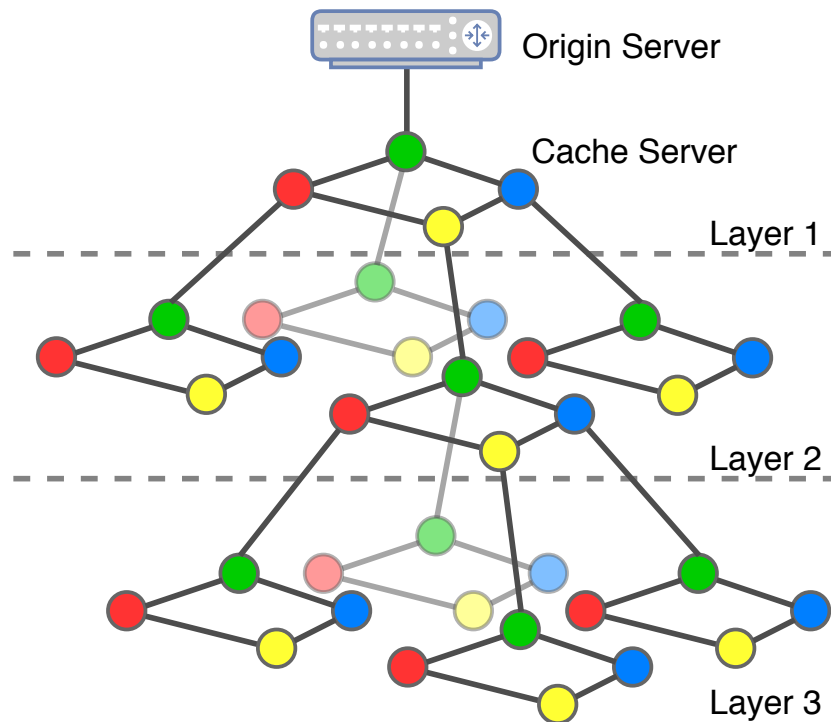


図 4.2.1: 色付けされた 3 階層のリングネットワーク

最大 200 秒分の動画チャンクを保持する．コンテンツへの彩色は，配信前にあらかじめ下層に対応する 4 色を全て彩色する．色タグとデータの経過時間を関連づけた対応表を作成しておき，各ノードは対応表を毎秒参照して自身のキャッシュ済みコンテンツの色を更新する．対応表はアクセス傾向に応じて手動で作成する．各階層の色数とコンテンツ数の対応を表 4.2 に示す． $k=0.5$ では，Layer3 のコンテンツに 4 色全て割り振り最新データを重複してキャッシュさせ，上層に行くほど分散してキャッシュする． $k=1.5$ では，リクエストが分散するため，Layer3 に新しめのデータを重複してキャッシュさせつつ，各階層で $k=0.5$ のときよりも実効キャッシュ容量を拡大させる．評価には比較対象として，キャッシュなし (w/o) と LRU を利用する．

4.2.2 実験中の通信量推移の評価

各ノードが何もキャッシュしていない状態から 1000 秒の間の通信量を図 4.3.1 と図 4.3.2 に示す．それぞれ $k=0.5$ の場合と $k=1.5$ の場合の，キャッシュが存在しない場合の通信量を 1 としたときの通信量推移を示している．図 4.3.1 では，LRU と提案手法ともに冒頭の 50 秒間は各ノードのキャッシュ容量内に収まるため殆ど通信が発生せず，以降は約 400 秒時点まで通信量が増大する．これは，ユーザ数の追加が約 400 秒時点で終了し，各ユーザは追加された時点の経過時間 N のデータを参照しつづけるためである．400 秒以降の通信量はおおよそ収束し，提案手法は w/o と比較して約 65%，LRU と比較して約 39%の通信量削減効果を示した．

図 4.3.2 では，冒頭から少し遅れてリクエストが集中して発生し，その後は分散してリクエストが発生するため，提案手法では冒頭 100 秒間でしばしばキャッシュミスが発生し LRU より通信量が増大する．リクエストが古いデータにも分散して発生するため，LRU では約 600 秒まで通信量が

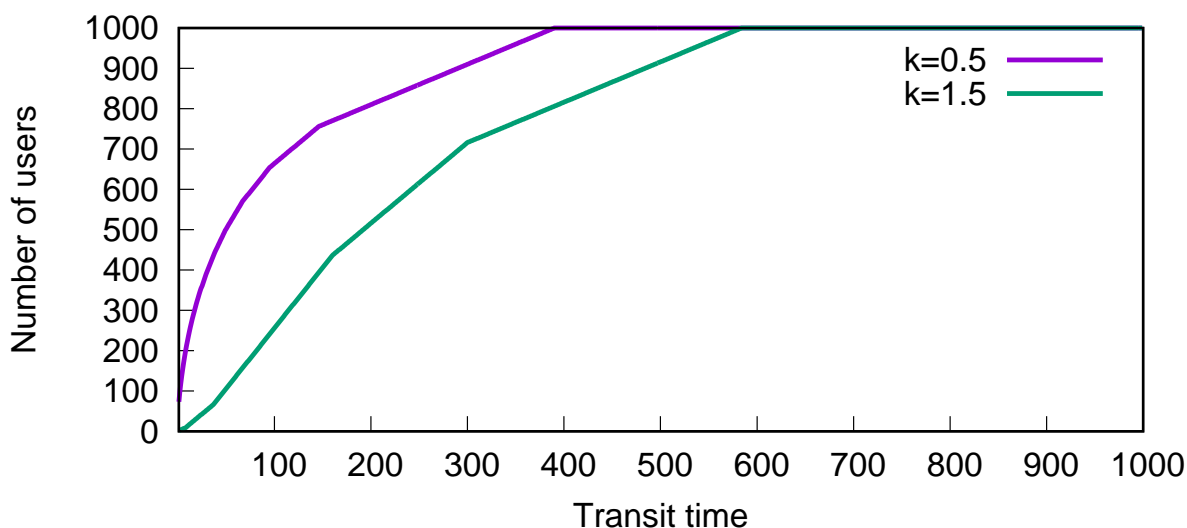


図 4.2.2: 時間経過と合計ユーザ数の関係

増大しつづけるが，提案手法ではコンテンツを分散してキャッシュすることで 100 秒以降の通信量を一定量に抑えている．こちらもユーザの新規視聴が止まった約 600 秒時点で通信量の変動は収束し，提案手法は w/o と比較して約 67%，LRU と比較して約 60%の通信量削減効果を示した．

4.2.3 合計通信量の内訳

実験開始から 1000 秒後までの合計通信量の内訳を $k=0.5$ ， $k=1.5$ それぞれ図 4.3.3 と図 4.3.4 に示す．図中の external traffic はオリジンサーバまで到達した通信量であり，internal traffic はネットワーク内部で発生した通信量を示す．図 4.3.3 では，提案手法の external と internal それぞれ，LRU と比較して約 56%と約 27%の通信量を削減している．合計では，LRU と比較して約 40%の通信量削減効果を示した．図 4.3.4 では，提案手法の external と internal それぞれ，LRU と比較して約 70%と約 54%の通信量を削減している．合計では，LRU と比較して約 56%の通信量削減効果を示した．実験の結果から提案手法では，実効キャッシュ容量の拡大により，ネットワーク中のノードにより多くの種類のコンテンツを保持することで，オリジンサーバに到達する通信を削減している．またアクセス頻度の高い重要なデータをユーザの近くに配置することで，キャッシュサーバ間の通信を削減できており，LRU より高い通信量削減効果を示した． $k=1.5$ のようにリクエストが分散して LRU が通信量削減率を低減している一方で，提案手法では安定した削減効果を示している．

4.3 議論

実験を通して，提案手法は LRU より高い通信量削減効果を示した．常に新規コンテンツが追加されるライブ配信では新規の人気コンテンツをキャッシュしやすい LRU が有効であるが，ユーザの視聴位置が分散してしまうと，通信量削減効果が低減してしまう．一方，提案手法では，あらかじめ色を設定しておくことで新規のコンテンツをユーザの近くにキャッシュさせ，時間が経過

したコンテンツの分散具合をアクセス傾向によって調整することで、ユーザの視聴位置が分散しても安定した通信量削減効果を示した。しかしながら、今回の実験条件では想定されるアクセス傾向を元にキャッシュ配置をあらかじめ決定している手法を取っているため、実際のライブ配信ではアクセス傾向を予測するか統計などからテンプレート化して自動化する仕組みを考案する必要がある。

今回のシミュレーション上では評価していないが、通信帯域によって画質を調整するような複数画質構造の配信の場合、各画質層を別々に色タグ管理することでキャッシュ割合を調整できる。例えば、配信サービスのユーザの殆どがスマートフォンを利用して視聴する場合、通信帯域や画面サイズによっては高画質なデータを転送する必要がない。このシナリオでは、低画質や中画質のデータをより多くキャッシュさせ、ユーザの近くに配置することで、通信量削減や転送時間の短縮が期待できる。

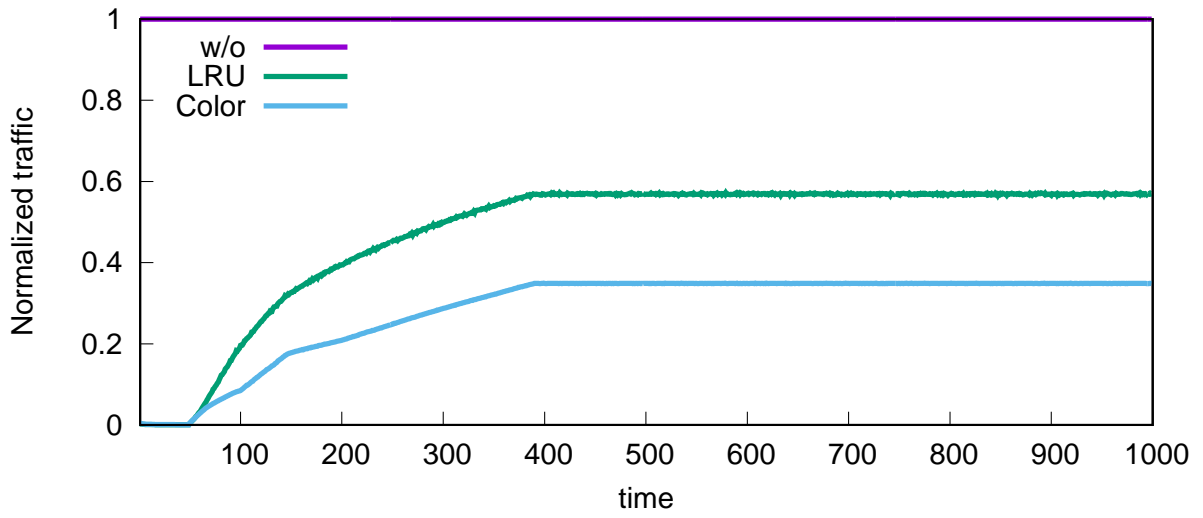


図 4.3.1: 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 ($k=0.5$).

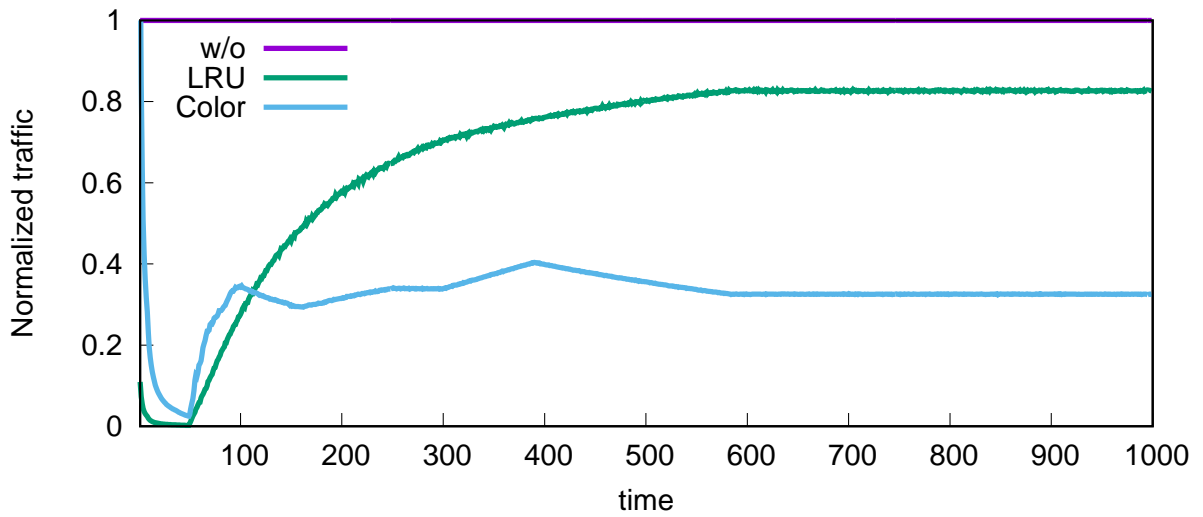


図 4.3.2: 評価対象ネットワークでの通信量削減効果 ($k=1.5$).

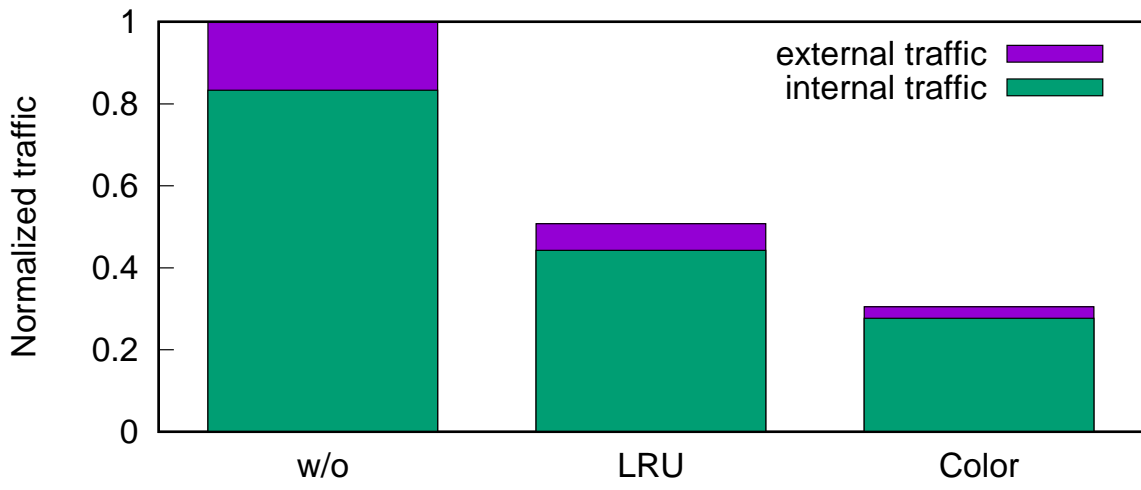


図 4.3.3: 評価対象ネットワークでの通信量の内訳 (k=0.5).

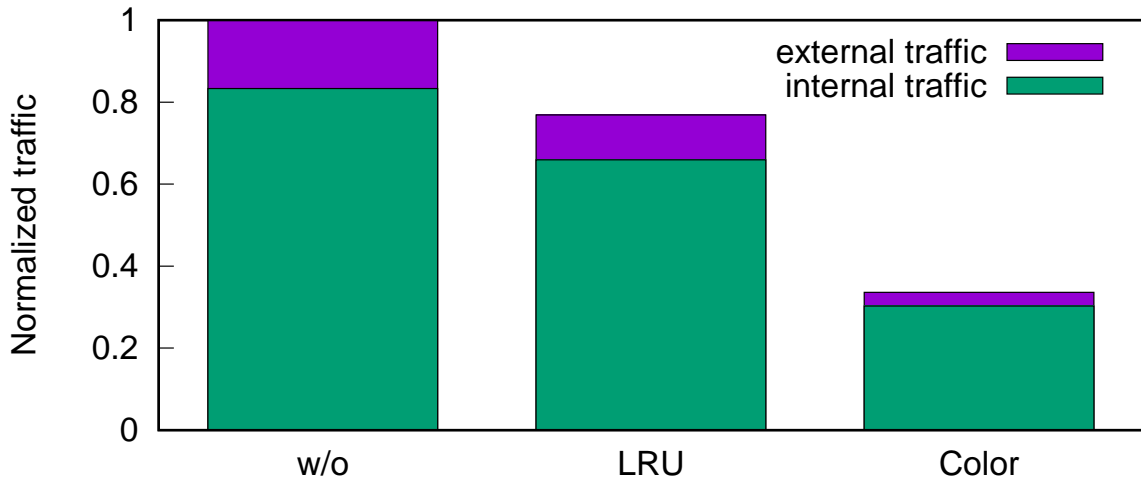


図 4.3.4: 評価対象ネットワークでの通信量の内訳 (k=1.5).

第5章 結論

本研究では、先行研究の色キャッシュを拡張し、VoD およびライブ配信の通信量削減を目的とした効率的なキャッシュ手法を提案した。

VoD では、動画再生位置の人気差に着目し、動画を複数のチャンクに分割して色タグ制御を行うことで、人気のチャンクを優先的にキャッシュする制御手法を提案した。55 ノードのバックボーンネットワークを対象にシミュレーションを行い、従来の色キャッシュ手法と比較して、最大約 79% の通信量削減効果を示した。さらに階層構造のネットワークでは、最大約 67% の通信量削減効果を示した。

ライブ配信では、動画データの経過時間とアクセス頻度の関係に着目し、最新データにはあらかじめ色を付与して、時間経過とともに色を更新する手法を提案した。3 階層のリングネットワークを対象にシミュレーションを行い、最新のデータへのアクセスの偏りが大きいとき、従来の LRU と比較して最大約 39%、偏りが小さいとき最大約 60% の通信量削減効果を示した。

今後の課題は、複数画質を持つライブ配信のときにユーザ層やアクセス傾向に応じて適切なキャッシュ割合を設定するための調査を行う。また、アクセス傾向をモデル化し、配信ごとのキャッシュ配置を自動化する。

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導を下さった吉永努教授に深く感謝申し上げます。研究についての助言や添削を頂いた中島拓真先輩，城間隆行先輩，ならびに研究生生活を通じて様々な協力を下さいました吉永・策力木格研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。また，共同研究においてサポートして頂いた TIS 株式会社 森元俊雄氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>.
- [2] Takuma Nakajima, Masato Yoshimi, Celimuge Wu, and Tsutomu Yoshinaga. Color-Based Cooperative Cache and Its Routing Scheme for Telco-CDNs. *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E100.D, No. 12, pp. 2847–2856, December 2017.
- [3] X. Cheng, J. Liu, and C. Dale. Understanding the Characteristics of Internet Short Video Sharing: A YouTube-Based Measurement Study. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 15, No. 5, pp. 1184–1194, August 2013.
- [4] L. Scott and C. Alistair. Netflix OpenConnect & FreeBSD. <https://people.freebsd.org/~scottl/Netflix-BSDCan-20130515.pdf>, May 2013.
- [5] Alessandro Finamore, Marco Mellia, Maurizio M. Munafò, Ruben Torres, and Sanjay G. Rao. YouTube Everywhere: Impact of Device and Infrastructure Synergies on User Experience. In *Proceedings of the 2011 ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement Conference, IMC '11*, pp. 345–360. ACM, 2011.
- [6] Does Video Length Matter? — Wistia Blog. <https://wistia.com/blog/does-length-matter-it-does-for-video-2k12-edition>, May 2012.
- [7] Want to Succeed with Facebook Videos? Keep Them Short. <https://www.socialbakers.com/blog/2222-want-to-succeed-with-facebook-videos-keep-them-short>, August 2014.
- [8] Karine Pires and Gwendal Simon. YouTube Live and Twitch: A Tour of User-generated Live Streaming Systems. In *Proceedings of the 6th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys '15*, pp. 225–230, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [9] T. Wauters, W. V. De Meerssche, F. D. Turck, B. Dhoedt, P. Demeester, T. V. Caenegem, and E. Six. Co-operative Proxy Caching Algorithms for Time-Shifted IPTV Services. In *32nd EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications (EUROMICRO'06)*, pp. 379–386, August 2006.
- [10] H. Abrahamsson and M. Björkman. Caching for IPTV distribution with time-shift. In *2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pp. 916–921, January 2013.

- [11] 城間隆行, 中島拓真, 吉見真聡, 入江英嗣, 吉永努. コンテンツピース毎のアクセス頻度による Web キャッシュ機構の構築. 信学技報 (CPSY-2014), 第 114 巻, pp. 35–40, November 2014.
- [12] J. Famaey, S. Latré, N. Bouten, W. Van de Meerssche, B. De Vleeschauwer, W. Van Leekwijck, and F. De Turck. On the merits of SVC-based HTTP Adaptive Streaming. In *2013 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM 2013)*, pp. 419–426, May 2013.
- [13] S. Ibrahim, A. H. Zahran, and M. H. Ismail. SVC-DASH-M: Scalable video coding dynamic adaptive streaming over HTTP using multiple connections. In *2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT)*, pp. 400–404, May 2014.
- [14] Hongliang Yu, Dongdong Zheng, Ben Y. Zhao, and Weimin Zheng. Understanding User Behavior in Large-scale Video-on-demand Systems. In *Proceedings of the 1st ACM SIGOPS/EuroSys European Conference on Computer Systems 2006*, EuroSys '06, pp. 333–344, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [15] Zhan Wang, Hai Jiang, Yi Sun, Jun Li, Jing Liu, and E. Dutkiewicz. A k-coordinated decentralized replica placement algorithm for the ring-based CDN-P2P architecture. In *The IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp. 811–816, June 2010.
- [16] W. Li, Y. Li, W. Wang, Y. Xin, and Y. Xu. A collaborative caching scheme with network clustering and hash-routing in CCN. In *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–7, September 2016.
- [17] Z. Li and G. Simon. In a Telco-CDN, Pushing Content Makes Sense. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 300–311, September 2013.
- [18] Adolfo Arteta, Benjamín Barán, and Diego Pinto. Routing and Wavelength Assignment over WDM Optical Networks: A Comparison Between MOACOs and Classical Approaches. In *Proceedings of the 4th International IFIP/ACM Latin American Conference on Networking, LANC '07*, pp. 53–63, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [19] D. C. Kilper, G. Atkinson, S. K. Korotky, S. Goyal, P. Vetter, D. Suvakovic, and O. Blume. Power Trends in Communication Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 275–284, March 2011.
- [20] A. Bianco, T. Bonald, D. Cuda, and R. M. Indre. Cost, power consumption and performance evaluation of metro networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 5, No. 1, pp. 81–91, January 2013.

発表論文

- [1] 岡田浩希, 城間隆行, 中島拓真, 策力木格, and 吉永努, “チャンク分割コンテンツ配置を用いた分散協調色キャッシュ,” in 信学技報 (CPSY-2017) , 2017, vol. 117, pp. 3-8.
- [2] H. Okada, T. Shiroma, C. Wu, and T. Yoshinaga, “A Color-Based Cooperative Caching Strategy for Time-Shifted Live Video Streaming,” in 2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), 2018, pp. 119-124.