

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	千田 進	学籍番号	1631092
論文題目	動画配信網におけるアクセス変動予測を用いた分散協調キャッシュ制御		
要旨	<p>動画配信サービスの普及、地上波のインターネット放送に伴いファイルサイズの大きなデータのやり取りが行われている。流通するインターネット通信量の8割が動画ファイルであることに着目し、この通信を削減することでオリジンサーバの負荷軽減に取り組む。</p> <p>先行研究の色タグ情報を用いた分散協調キャッシュ手法では、ユーザからの要求傾向が大幅に変化することを想定しておらず、IPTV サービスを調査した論文を参考にシミュレーション実験を行うと通信量削減効果が減少してしまう。株価などの推移予測を応用したコンテンツ人気推移予測手法では、単一キャッシュサーバでの通信量削減効果を調査しているが分散協調キャッシュへの拡張は検討されていない。</p> <p>本研究では動画配信サービスの将来の要求傾向を予測し、事前に効果的なキャッシュ配置手法を2種類検討することで通信量削減に取り組む。</p> <p>1 つ目は、要求の偏りを予測し、コンテンツの要求の偏りを予測し効果的なキャッシュ配置を適用する仕組みを提案する。この手法はコンテンツ要求の偏りの時間変化がパターン化されていることに着目し、時間帯毎に効果的なキャッシュ配置を設定するものである。この手法では日本のネットワークトポロジによるシミュレーション実験を行った結果、先行研究と比較し最大58%動画通信量の低減を確認した。しかしながら、ユーザの動画視聴要求数を評価に追加すると、要求数が多い時間帯の通信量を大きく削減することはできなかった。</p> <p>2 つ目は、新規コンテンツの人気を放送事業者の経験則から予測し、色タグ情報を用いた分散協調キャッシュ制御を導入しているキャッシュサーバに事前にコンテンツを配布する手法を提案する。本手法は効率的に通信量を削減するため、ユーザからの要求数が深夜の約40倍にもなるゴールデンタイムの時間帯の通信を削減できる。その結果ピーク時における動画通信量を約15-30%削減した。</p>		

平成29年度修士論文

動画配信網におけるアクセス変動予測を用いた
分散協調キャッシュ制御

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： 1631092

氏名： 千田 進

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30年1月29日

(表紙裏)

目次

第1章	序論	1
1.1	ネットワーク通信量の増加	1
1.2	コンテンツ配信ネットワークによる通信量削減	2
第2章	関連研究	3
2.1	コンテンツ配置による通信量削減	3
2.1.1	最適化アルゴリズムに基づくコンテンツ配置計算手法	3
2.1.2	ヒューリスティックな手法によるコンテンツ配置の探索	4
2.2	色タグ情報に基づく軽量な分散協調キャッシュ	4
2.3	コンテンツ人気の予測に基づく通信量削減	5
2.3.1	アクセス傾向の時間変化	5
2.3.2	要求傾向予測に基づくキャッシュ制御	7
第3章	アクセス変動予測を用いた分散協調キャッシュ制御	8
3.1	要求の偏り予測に基づく色キャッシュ制御	8
3.1.1	概要	8
3.1.2	アクセスログ解析に基づく偏り推移予測	8
3.1.3	簡易な彩色パターンの切り替え方法	8
3.2	評価	10
3.2.1	実験ネットワーク	10
3.2.2	通信量削減効果の検証	12
3.2.3	彩色パターン増加による通信量削減効果の検証	14
3.3	議論	15
第4章	新規コンテンツ追加の予測に基づく色キャッシュ制御	17
4.1	新規コンテンツ追加の予測に基づく色キャッシュ制御	17
4.1.1	概要	17
4.1.2	ヒューリスティックに基づくコンテンツの人気予測	17
4.1.3	人気予測とコンテンツの色付けの組み合わせ	18
4.1.4	色付けの更新間隔・タイミング	18
4.2	評価	21
4.2.1	実験ネットワーク	21
4.2.2	内部トラフィックとオリジンサーバへの要求の通信量削減効果の検証	21
4.2.3	ピーク時の内部トラフィック・オリジンサーバの通信量削減効果の検証	22
4.3	議論	22
4.3.1	内部トラフィックとオリジンサーバへの要求についての考察	22

4.3.2	ピーク時の要求の負荷分散についての考察	26
第 5 章	結論	27
	謝辞	28
	参考文献	30

目次

1.1.1 月間通信量と年度の関係 [1]	2
2.2.1 色キャッシュの仕組み	5
2.3.1 各時間に 100 位までの動画に集中するアクセスの割合 (破線部は 12:00, 0:00)	6
2.3.2 一週間に渡るコンテンツ要求数の推移	6
2.3.3 時間とトップ 100 の内入れ替わるコンテンツの割合	7
3.2.1 実験ネットワーク構成とキャッシュサーバの彩色	10
3.2.2 評価に用いた IPTV の Top100 コンテンツのリクエストシェアの割合	11
3.2.3 上位 100 位への要求の偏りと Gamma 分布のパラメータの時間推移 k	12
3.2.4 準最適なキャッシュ配置との通信量の比較	13
3.2.5 アクセスの偏りと通信量の時間推移	14
3.2.6 時間帯ごとの準最適配置の通信量の差分の平均値	15
4.1.1 想定した内部トラフィックの通信量の推移	18
4.1.2 事前配布機能時の 2 色の色キャッシュの動き	20
4.2.1 時間と総ホップ数の関係	23
4.2.2 時間とオリジンサーバへの要求数の関係	24
4.2.3 事前配布方式導入による通信量削減効果の検証	25

表目次

3.1	実験に用いるパラメータ	12
3.2	実験で用いた各偏りのコンテンツ彩色割当	13
3.3	コンテンツの彩色割当	16
4.2	実験ネットワークのノード数とリンク数	21
4.1	実験で利用した色の割り振り	21
4.3	実験で利用したパラメータ	22

第1章 序論

1.1 ネットワーク通信量の増加

YouTube や Amazon Prime ビデオなどの動画配信サービスの普及，地上波放送のインターネット放送，2020 年のテレビ事業者による 4K コンテンツ配信の移行に伴いファイルサイズの大きなデータがやり取りされる機会が増加している。本稿ではこのインターネットを介した IP 通信で配信される動画配信サービスを総じて「IPTV サービス」と呼ぶ。IPTV サービスの動画ライブラリは常に追加され続けており，効率よく人気のコンテンツの通信サービスを提供することが重要である。

ネットワーク機器ベンダの Cisco の調査によると，ネットワークを流れる年間のインターネット通信量は 2021 年には 2016 年からの 5 年間で 3 倍の 3.3ZB に到達すると言われている [2][1]。この調査によると，総インターネット通信量の 8 割は動画データファイルのやり取りによって発生している (図 1.1.1)。残りの 2 割にはゲームトラフィックやファイル共有，Web などの通信である。特にゲームのダウンロードはピーク期間行われることが多く，最頻時のトラフィックの 8% にも及ぶ。動画ファイルのトレンドにも大きな特徴があり，現在放送されているテレビ放送がインターネット回線を用いた放送の移行にともない多量のトラフィックを生み出す可能性がある。更に，ビデオ監視トラフィックもインターネット通信量を増大させる原因である。家庭やオフィスなどからクラウドへ継続的にアップロードが行われる。

やり取りされるデータ量の増加により，通信機器に大きな負荷がかかることで，通信機器の性能が低下してしまい，混雑リンクが発生する。インターネット回線が混雑することで，再生までの時間がかかってしまったり，動画が途中で止まってしまうだけでなく，重要なデータの遅延が発生する。インターネット回線の混雑緩和手法は，様々な方法が模索されている。通信機器の刷新による性能向上による混雑緩和は，金銭的成本が非常に大きく，導入に膨大な時間を要する。そのため，通信プロバイダ・放送事業者は低コストでインターネット回線の混雑を緩和する仕組みを求めている。

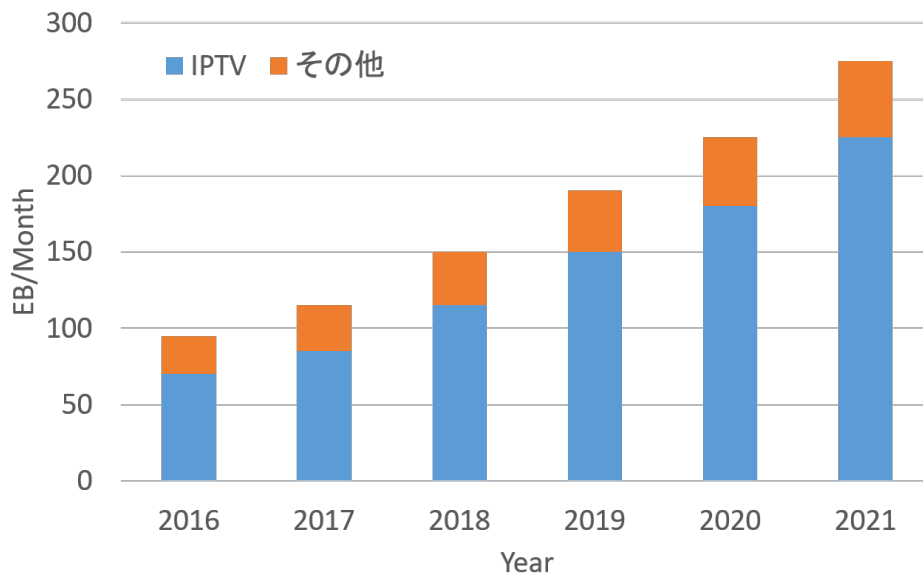


図 1.1.1: 月間通信量と年度の関係 [1]

1.2 コンテンツ配信ネットワークによる通信量削減

コンテンツ配信ネットワークとは Content Delivery Network（以下、CDN）であり、キャッシュネットワークを構成した環境で動画ファイルなどをユーザに届ける環境のことである。

IPTV サービスの通信量削減のためにはキャッシュの利用が効果的である。コンテンツのコピーをユーザの近くに配置しておき、遠方の配信元サーバとの通信を避ける。この仕組みにより、配信元サーバとキャッシュサーバ間に発生していた通信が削減される。またこの仕組みでは、同じコンテンツが要求されればされるほど、余分な通信が削減されるため、人気のコンテンツを効率よくキャッシュすることが通信量削減に大きく寄与する。

しかし 4 K 動画のように高精細化によるファイルサイズの増大が進んでいくコンテンツ、そもそもの動画ライブラリの増加に対応するには、キャッシュサーバ単体では対応しきれない。そこで、CDN 事業者は複数のキャッシュサーバを協調動作させ実効キャッシュ容量を拡大する仕組みが提案されている [3][4]。

本研究では動画配信サービスの将来の要求傾向を予測し、事前に効果的なキャッシュ配置手法を 2 種類検討することで通信量削減に取り組む。1 つ目はコンテンツ要求の偏りが時間変化することに着目し、色タグの彩色パターンを複数種類事前に計算し、各時間帯に効果的なキャッシュ配置を適用した。考察の結果、効率的に通信量を削減するためには、ユーザからの要求数が深夜の約 40 倍にもなるゴールデンタイムの時間帯の通信を削減することに着目した。2 つ目は新規コンテンツの追加に着目し、放送事業者の経験則に用いてコンテンツを事前にキャッシュサーバに配置することで、要求ピーク時の通信量を削減する。

第2章 関連研究

2.1 コンテンツ配置による通信量削減

コンテンツの配置を効率化することで通信量削減効率を高めることができる。キャッシュサーバ単体での通信量削減効果はキャッシュアルゴリズムによるところが大きい。一般的には1つのキャッシュポリシーで制御されているものが多いが、中には2つ以上のキャッシュポリシーで制御されているキャッシュアルゴリズムも存在する [5][6]。Zhou らのハイブリッドキャッシュ制御 [5] は Least Frequently Used (以下, LFU と表記する) と First In First Out (FIFO) を組み合わせた手法である。この制御ではユーザから要求が発生するたびキャッシュサーバでアクセスログを記録する。そのログ記録後, LFU 容量内にコンテンツがあれば, コンテンツをユーザに転送し, なければ FIFO 領域にコンテンツをキャッシュしてユーザに転送する。この仕組みでは, 新規コンテンツの追加に弱い LFU の欠点を FIFO 領域が補うことで, 新規コンテンツが追加される場合に LFU 単体のキャッシュアルゴリズムより高いヒット率を得ることを示した。しかしながら, FIFO 単体はキャッシュヒット率が低いアルゴリズムであるため, 変動に強い別のアルゴリズムを探すことが通信量削減効果を高めることに繋がる。

そこで中島らは, LFU アルゴリズムと Least Recently Used (以下, LRU と表記する) アルゴリズムを組み合わせたハイブリッドキャッシュを提案した [6]。LFU アルゴリズムは最も要求頻度の高いデータを保持するキャッシュアルゴリズムである。ユーザからの要求を記録し, その記録から要求された頻度順にコンテンツをソートしキャッシュ容量分コンテンツをキャッシュする。このアルゴリズムはキャッシュヒット率が高いが, アクセスログ集計後に追加された新しいデータを保持できない欠点が存在する。LRU アルゴリズムは, キャッシュ内容の置き換えが発生する場合に, もっとも最近アクセスされていないデータを追い出すアルゴリズムである。このアルゴリズムは新しいデータもキャッシュできるため変動には強いが, 直近のアクセスデータをキャッシュする代わりに後にアクセスされる可能性のあるデータを追い出してしまうためヒット率はそれほど高くないという欠点がある。このアルゴリズムを組み合わせることによって, 要求パターンが変わらない場合には LFU 領域で高いキャッシュヒット率を維持し, 変化する場合では LRU 領域でキャッシュヒット率の低下を抑制することが可能になる。

2.1.1 最適化アルゴリズムに基づくコンテンツ配置計算手法

複数のキャッシュサーバを協調動作させることによって, 実効キャッシュ容量を拡大し, 通信量削減効果を向上する仕組みが提案されている [3]。通信量削減効果はどのキャッシュサーバにどのコンテンツを保持させるか, コンテンツをどのような経路で取りに行くかによって大きく異なる。計算機器の性能向上から最適化アルゴリズムを利用し, 通信量削減効果の高いキャッシュ配置を求める研究が行われている。

Liらの文献[7]ではネットワークトポロジ、消費電力、キャッシュ容量、要求の偏りなどの制約条件を設定して最適化問題を構成し、遺伝的アルゴリズム（GA）を使用して通信量削減効果の高いキャッシュ配置を求めている。最適化アルゴリズムに基づくキャッシュ配置は通信量削減効果が高いが、その一方で長時間の計算を要するだけでなく制約条件が変化すると再計算が必要になる。その結果、コンテンツのアクセスログを収集してから分散協調キャッシュへの順最適配置を短時間で計算して、要求傾向の変化に追従することは困難である。

2.1.2 ヒューリスティックな手法によるコンテンツ配置の探索

Contents Centric Networkにおいて通信量を削減する手法の1つにネットワーク中にノード間の距離の情報からを利用してコンテンツを配置する手法がある[8]。この手法では、ホップ数を削減することを目的にネットワークの形状から、ホップ数を削減するためのキャッシュ配置を経験則を用いた簡易的な計算式から導く。

放送事業局の人気動画リリースの経験則に基づきコンテンツの配置を行うことで通信量削減を行うことができる可能性がある。

2.2 色タグ情報に基づく軽量な分散協調キャッシュ

コンテンツとキャッシュサーバに色タグ情報を割り振り、軽量な計算で効果的に通信量を削減できる仕組みの1つに色キャッシュが存在する[9][10]。コンテンツとキャッシュサーバに色タグを割り振ることで同じ色のグループを作成し、色がマッチする場合にキャッシュするよう制御することで、キャッシュ配置計算を単純化しつつ、準最適に近いキャッシュ配置を達成する。このキャッシュ配置は、総コンテンツ数、アクセスの偏り、キャッシュ容量、トポロジーを入力として与え、文献[10]では黄金分割探索アルゴリズム[11]を用いてテンプレート化する手法を提案している。中島らは、最近要求されたコンテンツの挿入位置を変更することでLRUアルゴリズムより更に通信量削減効果を向上させたModified LRU[4]と色キャッシュ領域をハイブリッドキャッシュにすることで急激な変動にも耐えることができるようキャッシュ制御を設計した。

色キャッシュではサーバ間のキャッシュ重複を考慮し、実効キャッシュ容量を拡大して通信量を削減するよう、四色定理[12]の要領で各サーバと同色の色タグが付与されたサーバが隣合わないよう彩色されている。これにより、異なる色タグのサーバが隣接しやすくなり、自サーバにキャッシュされていないコンテンツが隣にあることが多くなる。そのため、ホップ数を少なくすることができ、コンテンツを取得しやすい。

図2.2.1では4色に塗り分けた4台のキャッシュサーバが、4色の色情報を持つ高人気コンテンツを重複してキャッシュすると共に、自身と同色の色情報を持つ中低人気のコンテンツを分散キャッシュする状態を例として示している。要求頻度の高いコンテンツには多数の色タグが付与されているため、多数のキャッシュサーバで保持され、要求したユーザから短いホップ数で取得できる。一方、中低人気コンテンツには1色しか色タグが付与されていないため、ネットワーク中に分散されてキャッシュされているため、実効キャッシュ容量を圧迫せず、オリジンサーバへの要求を減少することができる。

しかしながら、次章で述べるユーザの要求傾向の変動については考慮されていない。

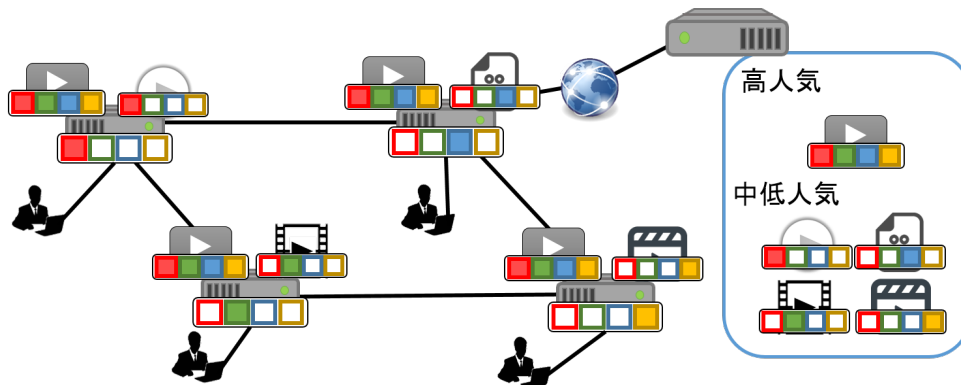


図 2.2.1: 色キャッシュの仕組み

2.3 コンテンツ人気の予測に基づく通信量削減

2.3.1 アクセス傾向の時間変化

Abrahamsson らの北欧 IPTV サービス「TeliaSonera」の視聴履歴を調査した文献 [13] によると、ユーザの視聴要求少数の番組・動画に大きく偏っており、その偏りが時間変化することが示されている。図 2.3.1 はある一週間中の各時間帯にトップ 100 位のコンテンツに発生した要求の割合を示したグラフである。深夜の時間帯には上位のコンテンツに約 80% の要求が集中し、ゴールデンタイムに当たる 19-22 時の時間帯は約 30-40% の要求が集中する傾向がある。要求の偏りはガンマ分布に従い人気上位のコンテンツに対して偏りが発生するとされている [14]。

図 2.3.2 によるとゴールデンタイムには要求が集中しており、深夜の時間帯の約 40 倍の要求が発生している。この時間帯の通信量を削減することは全体の通信量削減だけでなく、ピーク時のオリジンサーバに対する要求数の負荷軽減に繋がる。

図 2.3.3 にはトップ 100 中の何割のコンテンツが入れ替わるのかを示したグラフを示す。深夜の時間帯には約 8 割ものコンテンツが入れ替わり、ゴールデンタイムの時間帯は約 2-4 割のコンテンツが入れ替わる。このグラフはこの一週間を通して各曜日が同様のパターンで遷移しており、パターン化が容易である。

図 2.3.2, 図 2.3.3 によると、深夜の時間帯は視聴者が少なく個人の趣向が反映されるため予測しにくい入れ替わりが発生する。ゴールデンタイムの時間帯は、視聴者も多く番組の入れ替わりも約 20-40% 程度であるため、視聴傾向を比較的に予測しやすい。

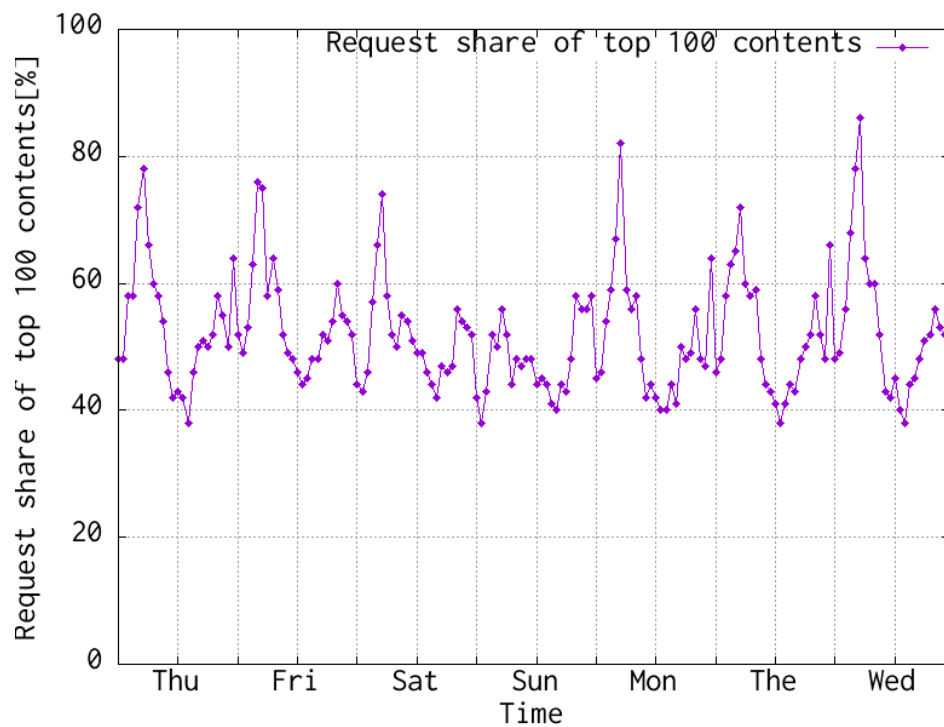


図 2.3.1: 各時間に 100 位までの動画に集中するアクセスの割合 (破線部は 12:00, 0:00)

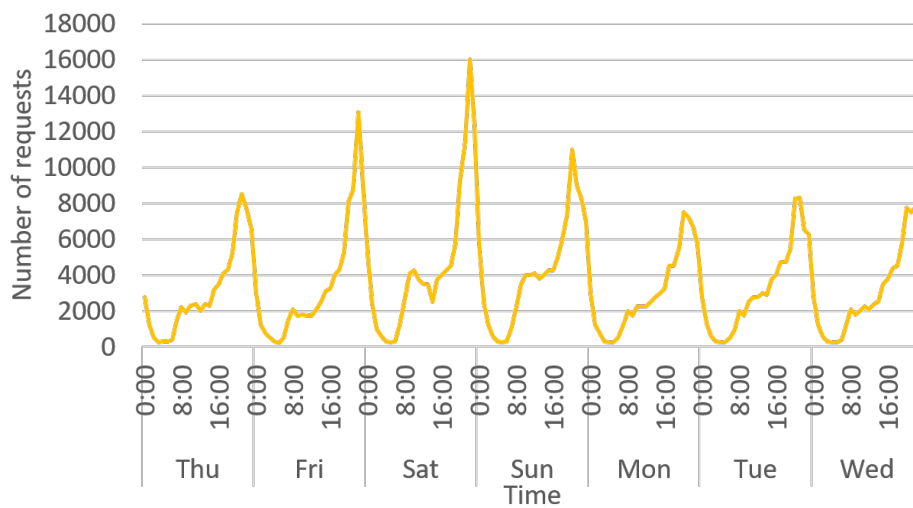


図 2.3.2: 一週間に渡るコンテンツ要求数の推移

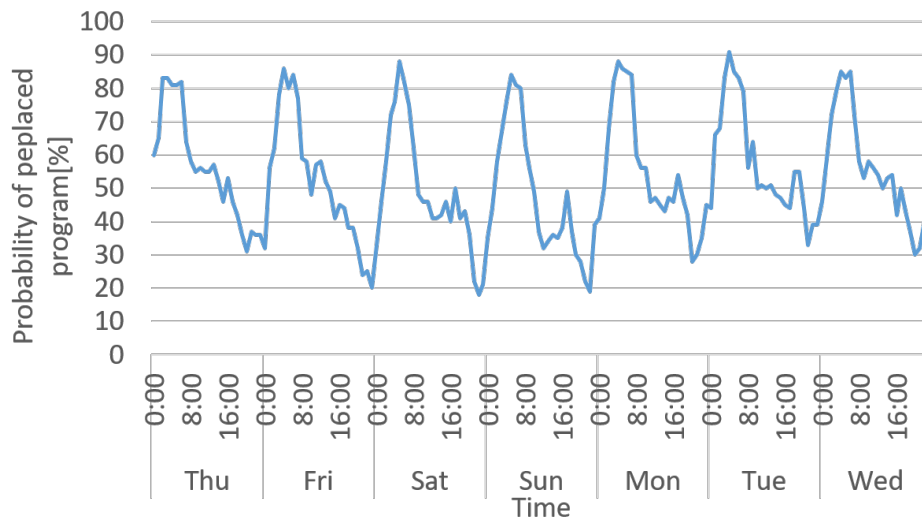


図 2.3.3: 時間とトップ 100 の内入れ替わるコンテンツの割合

2.3.2 要求傾向予測に基づくキャッシュ制御

Nesrine らの文献 [15] によると、自己回帰移動平均 (ARMA) モデルに基づき、各コンテンツの将来の要求確率を予測することで、キャッシュするコンテンツを管理する手法が提案されている。この ARMA モデルは株価の推移予測によく利用され、過去の数値の遷移を入力することにより、将来の値を推定する計算モデルである。彼らは YouTube の動画を無作為に選び、各動画の視聴数推移を一定期間記録し、ARMA モデルに入力することで、動画のアクセス数を予測した。各動画のアクセス数予測を元にキャッシュする優先度を設定することで、将来のアクセス数に合わせたキャッシュ制御を行い、LFU アルゴリズムを上回る通信量削減効果を示した。

しかしながら、単一キャッシュサーバの導入のみにとどまっており、複数キャッシュサーバを組み合わせた分散協調キャッシュ制御の環境下での検討はおこなわれていない。

第3章 アクセス変動予測を用いた分散協調キャッシュ制御

3.1 要求の偏り予測に基づく色キャッシュ制御

3.1.1 概要

本論文では、IPTV サービスの要求の偏り変動を予測し、その要求の偏りに合わせて色キャッシュ制御の彩色パターンを事前計算し、キャッシュ配置を適用する。この手法により毎単位時間効果的なキャッシュ配置が適用されるため、軽量の計算で時間変化する要求の偏りに追従することが可能である。

3.1.2 アクセスログ解析に基づく偏り推移予測

ユーザからの動画に対する要求がガンマ分布に基づいた偏りで生成されると仮定し、事前に複数の偏りに合わせた彩色パターンを用意する。その後、過去の要求傾向を元に一定期間の偏りの推移をパターン化することで、将来の偏りパラメータに合わせた彩色パターンを使用して色キャッシュを制御する。

要求の偏りの推移をパターン化するため、図 2.3.1 に示した IPTV サービスの上位 100 位のコンテンツに対して発生する要求傾向について考察する。IPTV サービスのアクセスログを解析した文献 [13] によると、上位 100 位のコンテンツに対して発生する要求割合は、午前 5:00 ごろをピークとして 1 日周期で推移している。

事前に IPTV サービスの過去の曜日・時間帯におけるユーザからの要求傾向が未来に当てはまることをアクセスログから解析する。その IPTV サービスの要求の傾向に適した効果的なキャッシュ配置を適用することによって、インターネット通信量を削減することが期待できる。

ユーザの要求の偏りが定まれば色キャッシュのコンテンツの彩色割当は一意に定まるため、事前にコンテンツ彩色を計算しておくことが可能である。以降の彩色は、サービス中のランキング情報を取得し、そのランキング順にコンテンツへの再利用した色を割り当てる。このような手順を踏むことで、パターン化された将来の偏りのパラメータに基づき、事前に計算済みの彩色パターンを利用するため、コンテンツ彩色に要する計算を大幅に簡単化できる。

3.1.3 簡易な彩色パターンの切り替え方法

ユーザの要求の偏りを予測し適切なキャッシュ配置を利用するため、コンテンツに割り振る彩色を変更する制御を行う。先行研究 [9] では要求の偏りが一定の状況下でキャッシュサーバとコンテンツに 4 つの色タグの割当を行う場合、1 パターンのキャッシュ配置を決定するため 4bit をコンテンツの色情報タグに付与していた。本研究では、(色数 × 彩色パターン数)bit をコンテンツを

割り振ることによって、要求の偏り数に応じた彩色割当を事前に設定する。キャッシュサーバは各時間帯の要求の偏りから読み取り部分を変更し、時間帯のコンテンツのキャッシュ配置を変更する。前述の仕組みによりキャッシュ配置がその時間帯に適したものに變更される。この仕組みにより、事前に計算しておいた複数の彩色パターンを一命令で切り替えることができるため、急激に要求の偏りが変動した場合でもキャッシュ配置を瞬時に變更可能である。この仕組みにより要求の偏りに追従することで通信量の削減に寄与する。

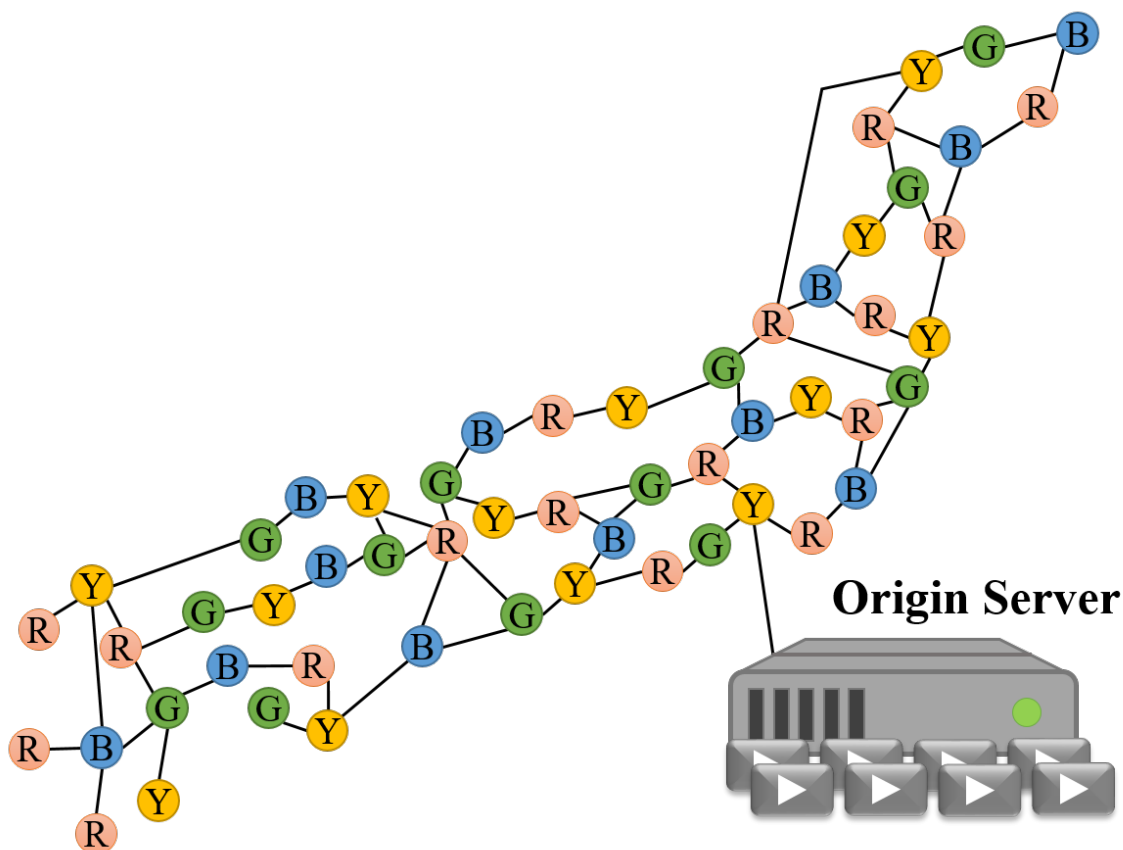


図 3.2.1: 実験ネットワーク構成とキャッシュサーバの彩色

3.2 評価

3.2.1 実験ネットワーク

提案する要求傾向に基づく予測キャッシュ制御の有効性を評価するため、図 3.2.1 に示す NTT ネットワークを模したトポロジ [16] でシミュレーション実験を行った。

トポロジ内の円はキャッシュサーバを表し、RGBY の 4 色に彩色されている。オリジンサーバは図中の黄色のノードに対応する、東京に接続されたキャッシュサーバと接続されている。各サーバは文献 [9] で提案されている改変版 Welsh-Powell のアルゴリズムを使用し、隣接するキャッシュサーバが同じ色にならず、色間距離が大きくなるよう彩色されている。このようにすることで、各色をネットワーク中に一様に配置できる。コンテンツ総数は 1000、各キャッシュサーバのキャッシュ容量は 100 とした。

コンテンツに対するアクセスの偏りはガンマ分布 [14] に基づいて発生させた。なお、ガンマ分布の要求の偏りパラメータは、図 2.3.1 に示した水曜日のアクセス推移情報を元に算出し、図 3.2.2 のように時間推移するように設定した。コンテンツ総数と、各順位までのアクセス総数がわかれば、ガンマ分布の偏りパラメータ k は一意に定まる。

提案方式のキャッシュ配置は、要求の偏りの変動を予測し、1 時間毎に各時間帯において効果的なキャッシュ配置に近いものに設定する。比較アルゴリズムは、キャッシュなし (w/o cache),

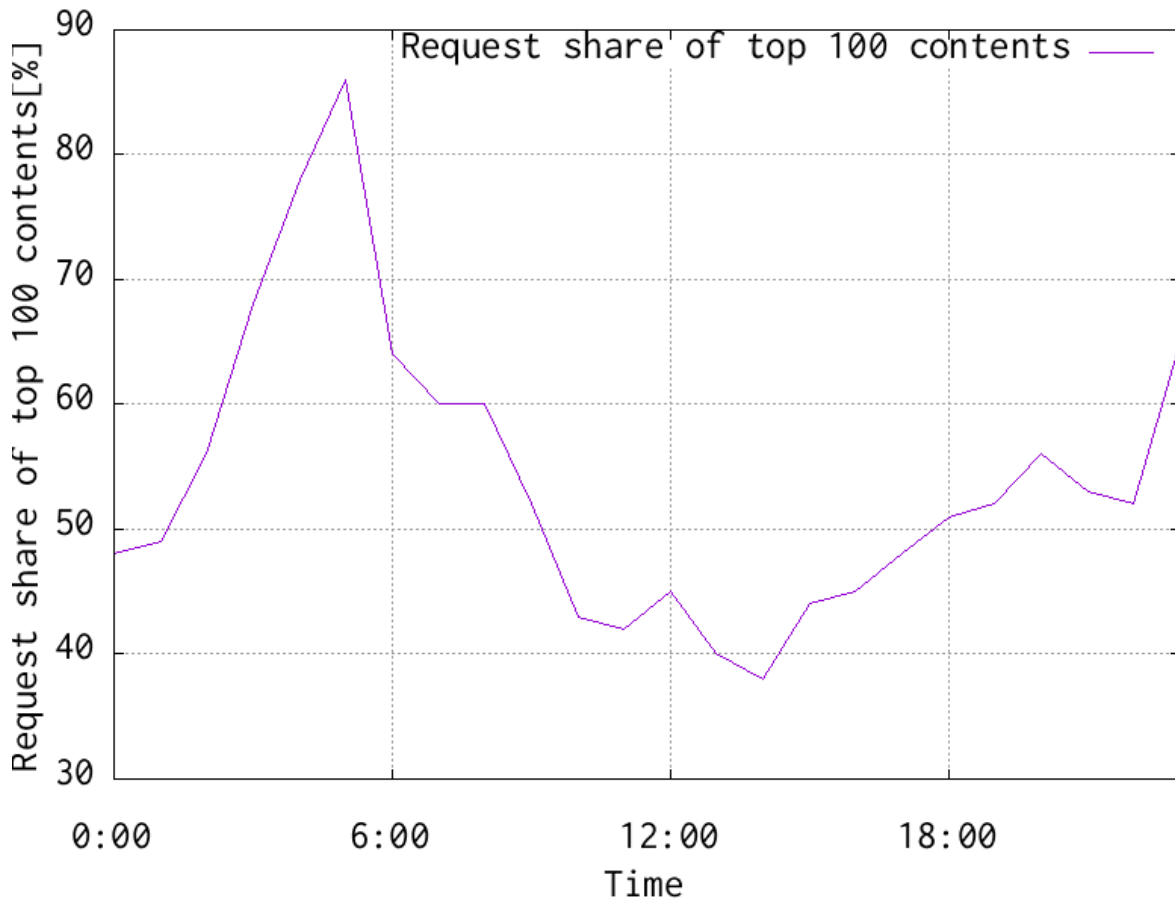


図 3.2.2: 評価に用いた IPTV の Top100 コンテンツのリクエストシェアの割合

LFU, 彩色パターン1つの色キャッシュ (偏り大・小), 提案方式の計5つのキャッシュ機構とする. 実験で用いた色キャッシュの彩色割当を表3.2に示す.

Liらの文献[7]を元に通信量の計算方法を決定した. まず, あるコンテンツの要求割合と取得ホップ数を掛け合わせることで, あるコンテンツを取得する為に要するホップ数の期待値を算出する. 上記の計算を全てのコンテンツの期待値を算出するために行う. 最後に全てのコンテンツの期待値の総和を通信量として算出する. 以下に通信量を算出する式を示す.

$$\sum_I \sum_J \sum_K e_{ij} p_{ik} y_{ijk} \quad (3.2.1)$$

ここで(3.2.1)式で用いるパラメータを, e_{ij} はユーザ i からキャッシュサーバ j までのホップ数, p_{ik} はユーザ i がコンテンツ k にアクセスする確率, y_{ijk} はユーザ i からコンテンツ k をキャッシュしているサーバ j までのホップ数が最小なら1, それ以外は0, と定義した.

数式3.2.1をキャッシュなしを分母に, 比較アルゴリズムを分子にしたものを以下の実験で用いる通信量 (Traffic)[%] と定義した.

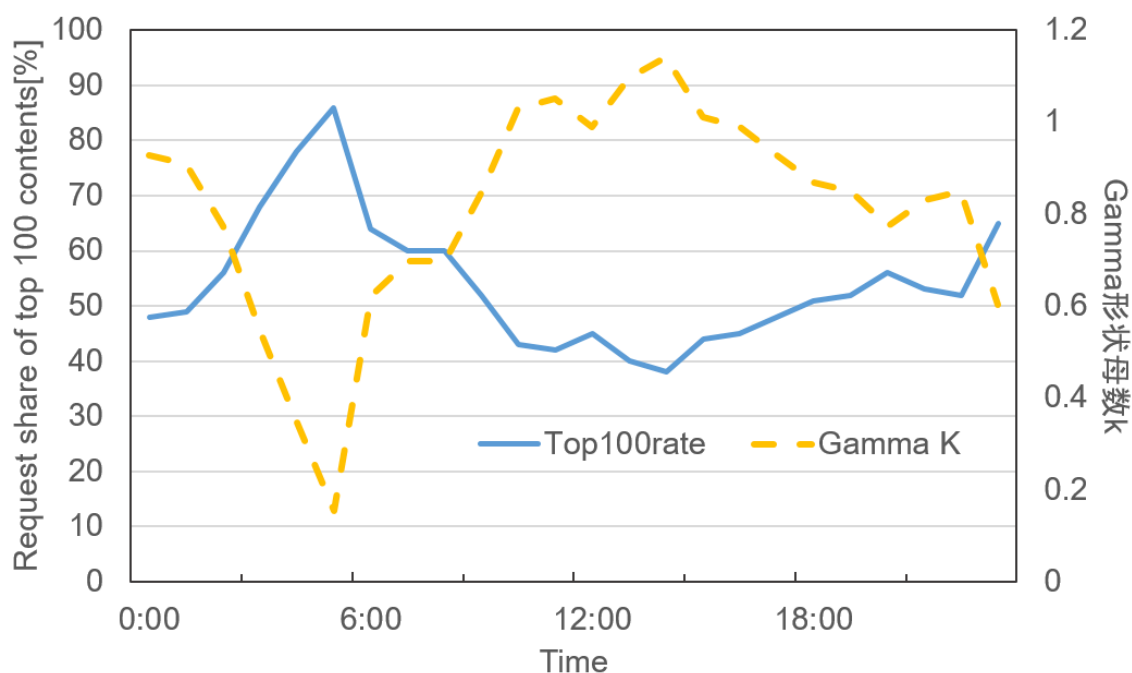


図 3.2.3: 上位 100 位への要求の偏りと Gamma 分布のパラメータの時間推移 k

3.2.2 通信量削減効果の検証

ユーザの要求の偏りが時間変化する状況下において、通信量削減効果を評価した。図 3.2.4 では全て準最適なキャッシュ配置で計算した場合と本提案方式の通信量を比較した。図 3.2.5 には計 5 つのキャッシュアルゴリズムで時間と通信量の関係と比較した。

図 3.2.4 では提案方式と毎単位時間毎に最適配置を行ったキャッシュ制御、計 2 つのキャッシュ機構で時間帯と通信量の関係を示している。図 3.2.4 によると 6:00-8:00 の時間帯、要求に対する偏りが中間の場合、約 5%ほど通信量の増加が見られるが、その他の時間帯では同等の通信量となっている。この増加も彩色パターン数を増やすことによって更に減らすことができる。以上の結果から、本提案方式は長時間を要する事前のキャッシュ配置計算回数を小さく抑えつつ、コンテン

表 3.1: 実験に用いるパラメータ

説明	パラメータ
コンテンツ数	1000
キャッシュサーバー台あたりの容量	100
Gamma 分布	
形状母数 k	図 3.2.3 を参照
尺度母数 θ	170.6067

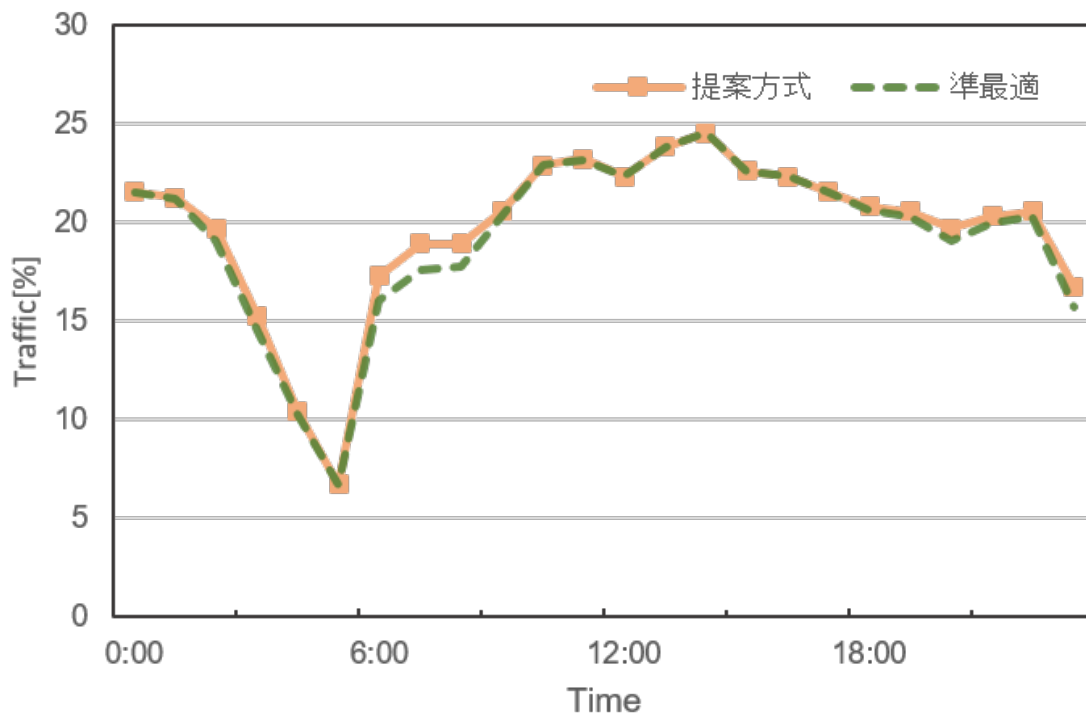


図 3.2.4: 準最適なキャッシュ配置との通信量の比較

ツの最適配置に近い、高い通信量削減効果を維持する。

図 3.2.5 ではキャッシュなし、LFU、彩色パターン1つの色キャッシュ（偏り大・小の計2つ）、提案手法の計5つのキャッシュ機構で時間帯ごとの通信量を示している。色キャッシュ制御の彩色割当を表 3.2 に示す。

提案方式の通信量は、キャッシュサーバを配置していない状況と比較すると最大約 90%、最小約 78% 削減された。また、アクセスパターンが静的の場合に通信量削減効果が理論上最大となる LFU アルゴリズムと比較しても、通信量を最大約 60% 削減できた。色キャッシュは単一サーバで動作する LFU アルゴリズムと比較して、分散協調キャッシュ制御を行うことで、実効キャッシュ容量が増加したためである。

最適配置計算回数 1 回の場合と提案手法を比較すると、通信量は最大約 58% 削減された。図中の 5:00 の通信量に着目すると、偏りが大きいと判定した彩色パターンと提案方式を比較した場合、

表 3.2: 実験で用いた各偏りのコンテンツ彩色割当

アクセスの偏り	4色	3色	2色	1色
大	20	40	70	270
小	0	0	0	400

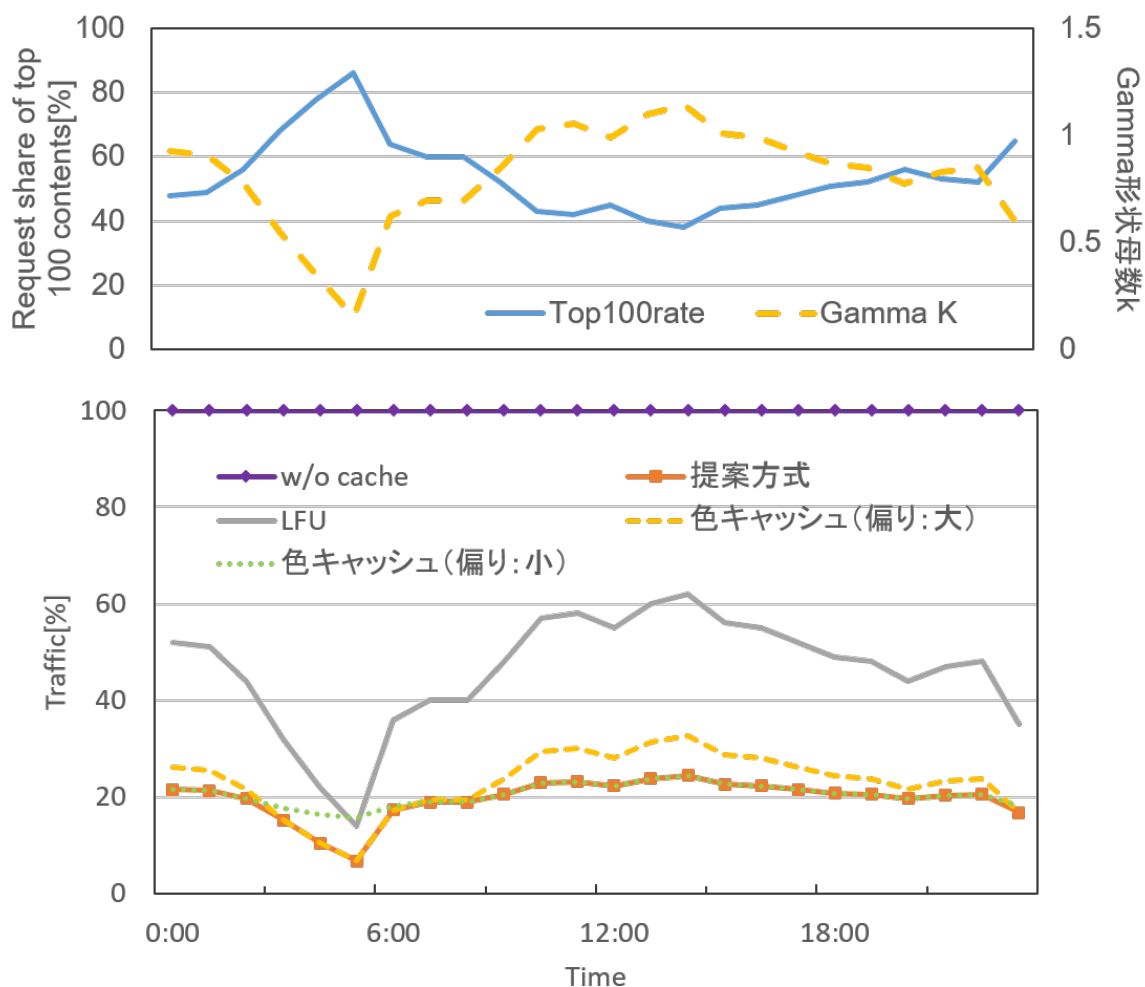


図 3.2.5: アクセスの偏りと通信量の時間推移

通信量は 58% の差が生じる。一方で、図 3.2.5 中の 14:00 の通信量に着目すると、偏りが小さいと判定した彩色パターンと提案方式を比較した場合、通信量は約 26% の差が生じる。

3.2.3 彩色パターン増加による通信量削減効果の検証

本提案方式では、2 パターンのキャッシュ配置を算出し、その 2 パターンを予測に基づき時間帯ごとに適切な配置に切り替える。図 3.2.6 に全時間帯の最適配置を計算した通信量との差分の平均と用意する彩色パターンの計算回数との関係を示す。表 3.3 に偏りパラメータごとの彩色割当パラメータを示す。複数の彩色パターンをもち予測キャッシュ制御を行う場合の通信量の算出には、3 回目に上位 100 の要求割合が 60% の時最適な彩色配置を追加、4 回目に 72% の彩色配置を追加、5 回目に 46% の彩色配置を追加した。2 回目の時点で毎単位時間最適配置を計算したキャッシュ制御と比較した時の誤差が、1% 以内に収まった。この結果から、彩色パターンの増加を行うことで通信量削減効果を向上させることが可能であるが、その向上は少ない。つまり、より多くの通信

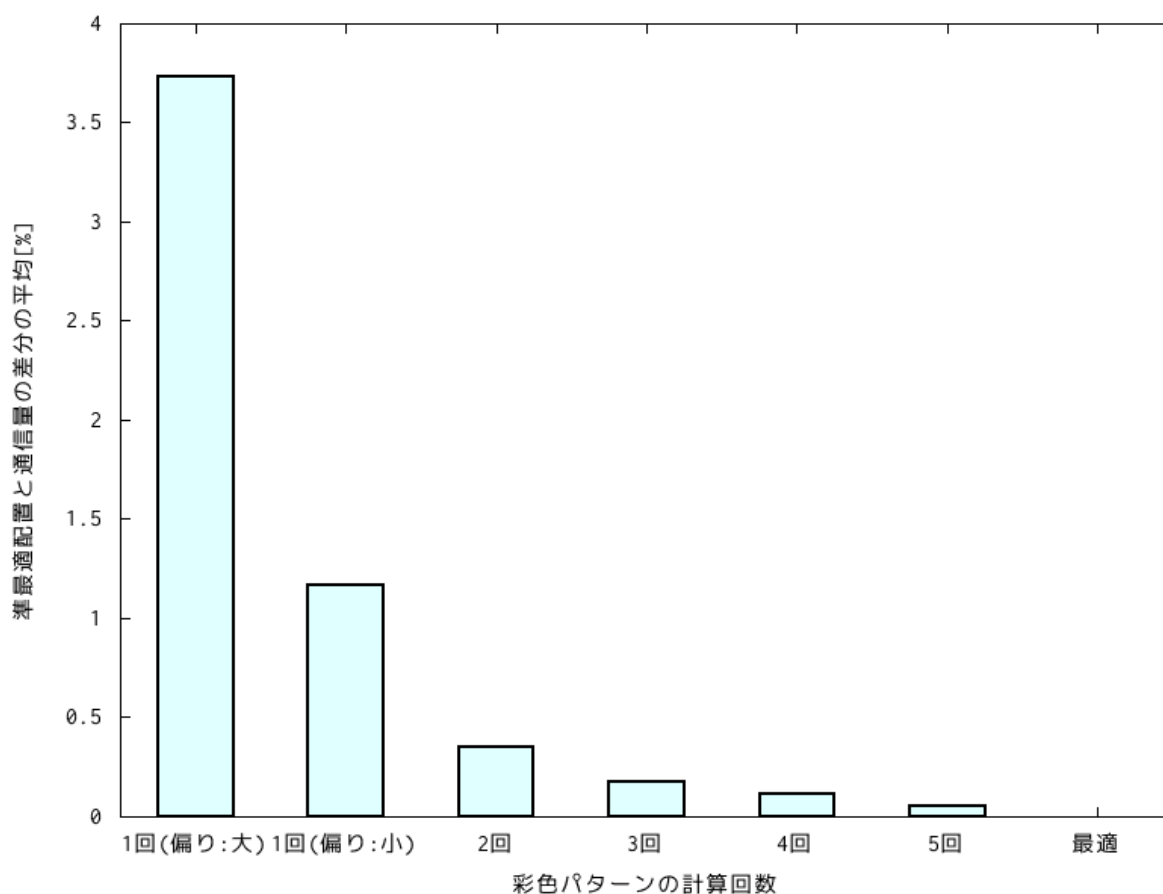


図 3.2.6: 時間帯ごとの準最適配置の通信量の差分の平均値

量を削減するためには、できるだけ多くの彩色パターンを計算すべきであるが、少ない彩色パターンでも通信量の差分の平均を 1%以内に収めることができる。

3.3 議論

本提案方式を評価するにあたって、ネットワークの通信量負荷を表す軸としてキャッシュなしと比較した場合の削減割合を元に図 3.2.5 に示す通り評価を行った。削減割合を評価することは、キャッシュヒット率などの算出を行う場合において、有効な比較方法である。一方、IPTV サービスの視聴傾向を評価するにあたって、割合としての評価はユーザからの総要求数を評価の指標に向いていない。

今回通信量の削減割合では、提案方式と従来方式は最大 58%差通信量削減効果を示したが、通信総量として比較した場合、1日の通信量削減効果は最大 5%程度となってしまう。

通信総量を評価の軸として考える場合には、もっともユーザからの要求数が多い時間帯の通信量を削減することが、ネットワークの負荷低減に繋がる。水曜日の通信総量 [13] を調査したところ、ユーザの要求数が最も大きい 3 時間の要求数は全体の約 35%であることがわかった。この時間帯は一般的にゴールデンタイムと呼ばれる 21:00 から 23:59 までの 3 時間である。以上より、通信量

を効率的に削減するためには、ユーザの要求数の多い時間帯の通信総量を削減することが、ネットワークの負荷低減に繋がることがわかった。

表 3.3: コンテンツの彩色割当

要求の偏り	4色	3色	2色	1色
86%(大)	20	40	70	270
72%	9	25	55	311
60%	3	19	41	337
46%	0	4	16	380
38%(小)	0	0	0	400

第4章 新規コンテンツ追加の予測に基づく色キャッシュ制御

4.1 新規コンテンツ追加の予測に基づく色キャッシュ制御

4.1.1 概要

通信総量を削減するためにはユーザからの要求がピーク時に効果的なキャッシュ配置を適用することが通信量の削減に大きく貢献する。§3より発展した内容として、

- ユーザからの要求数
- 新規コンテンツの挿入

についても要求傾向パラメータの追加を行い、より現実的な状況を想定した通信量削減を目指す。

放送配信事業者による新規コンテンツの挿入は、アクセスログもないため、キャッシュサーバでキャッシュしにくい。LFUアクセスログを元にコンテンツをキャッシュしているため、新規コンテンツをキャッシュできない。新規コンテンツの挿入により、効果的なキャッシュ配置が予測できないため通信量が増加してしまう。

本研究では次点に人気になるコンテンツを予測し、色キャッシュの仕組みを用いて、キャッシュサーバに事前にコンテンツを配布しておく仕組みの提案を行う。この仕組みにより、キャッシュ容量が圧迫される問題を解決する必要があるが、初期参照ミスはなくなり効果的なキャッシュ配置を事前に整備するため、リリース時に集中するオリジンサーバの負荷低減かつ通信量の削減を達成する。

4.1.2 ヒューリスティックに基づくコンテンツの人気予測

図 2.3.2, 図 2.3.3 によると、深夜の時間帯は視聴者が少なく個人の趣向が反映されるため予測しにくい入れ替わりが発生する。一方、ゴールデンタイムは各放送事業者のコンテンツが多数の視聴者により要求されるため、統計データが取りやすく、予測しやすい。この環境を用いて、ゴールデンタイムの時間帯に人気になるコンテンツを予測し、事前にコンテンツをキャッシュサーバに配布する。

通信事業者・動画配信事業者は経験則によるヒューリスティックから人気になるコンテンツを予測することができる仮定に基づく、そのヒューリスティックに基づきコンテンツを事前にキャッシュサーバに保持しておくことでピーク時の負荷低減・通信量削減が可能になる。

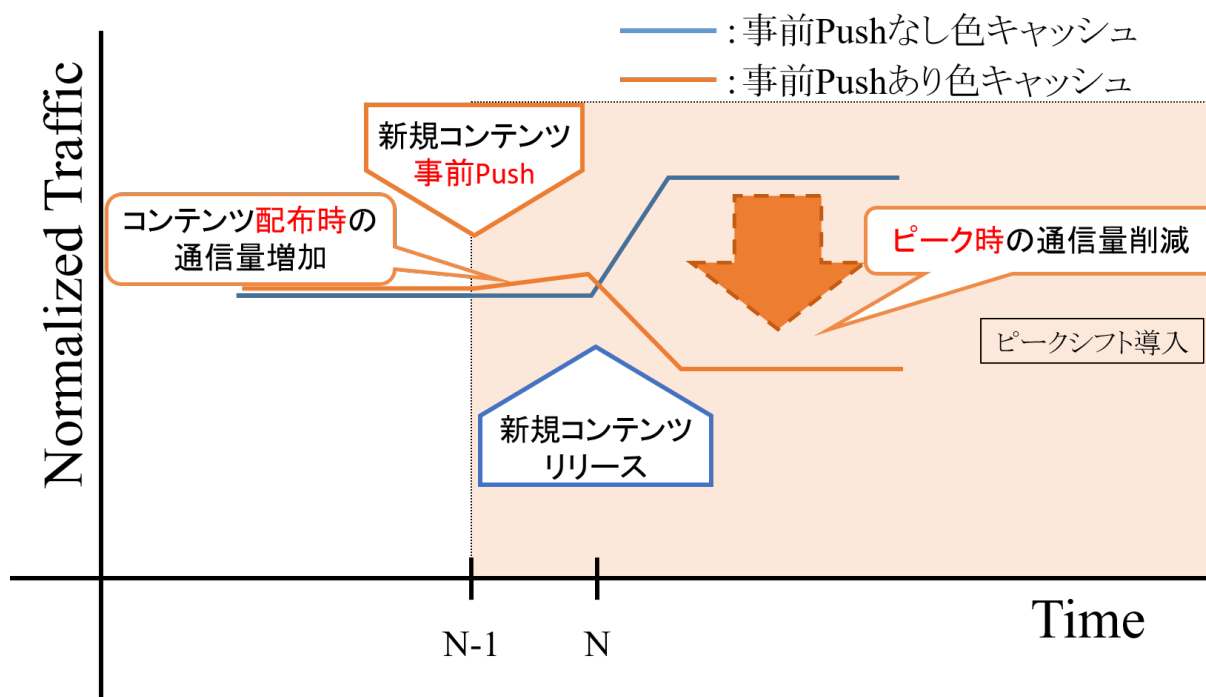


図 4.1.1: 想定した内部トラフィックの通信量の推移

4.1.3 人気予測とコンテンツの色付けの組み合わせ

新規コンテンツに色タグ情報を事前に付与し、リリース前にコンテンツを事前配布する。その際に効果的なキャッシュ配置を可能にする色キャッシュの保持テンプレートを利用することにより効果的なキャッシュ配置を可能にする。この仕組みにより、リリース直後に集中するオリジンサーバの負荷を軽減することができる。

事前配布する際には、リリース前のコンテンツは要求されないため、要求されないコンテンツにキャッシュサーバの実効キャッシュ容量が圧迫されてしまう。そのために、常に要求されないコンテンツを持ち続けるのではなく、リリース直前に新規コンテンツを事前配布することが通信量削減効果を高めることに繋がる。

図 4.1.1 に本提案手法を追加した際の、時間と通信トラフィックを示した例を示す。この図は予測を行いコンテンツを事前に配布することによって、通信量削減効果を高めることを示している。N-1 時点において、コンテンツを事前にキャッシュサーバに配布する。この時通信トラフィックは、「コンテンツを配布する際の通信量」と「要求されないコンテンツによって実効キャッシュ容量が減少する」ため、事前配布を行っていない場合より増加してしまう。しかし、N 時点の新規コンテンツリリース後において、事前配布を導入した仕組みは N 時点において既に効果的にコンテンツが配布されているため通信量が削減される。

4.1.4 色付けの更新間隔・タイミング

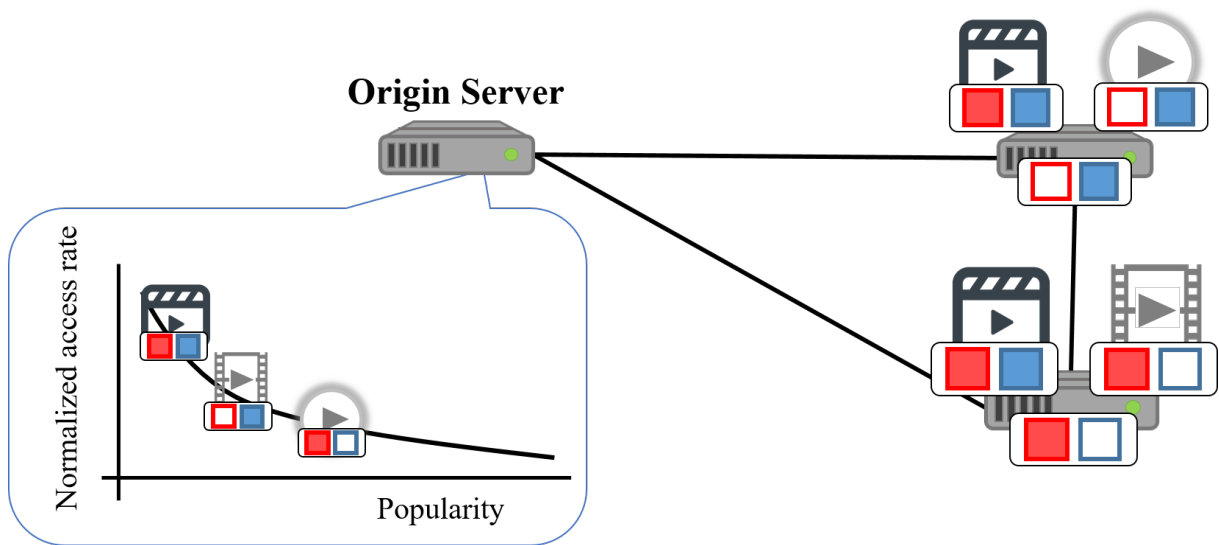
本提案方式では、色の更新と事前配布のタイミングを同期することで、事前配布する処理を簡単化する。この処理により、予め用意されていた効果的なキャッシュ配置テンプレートを適用さ

せるだけで、リリース前に新規コンテンツが効果的なキャッシュ配置に整列する。

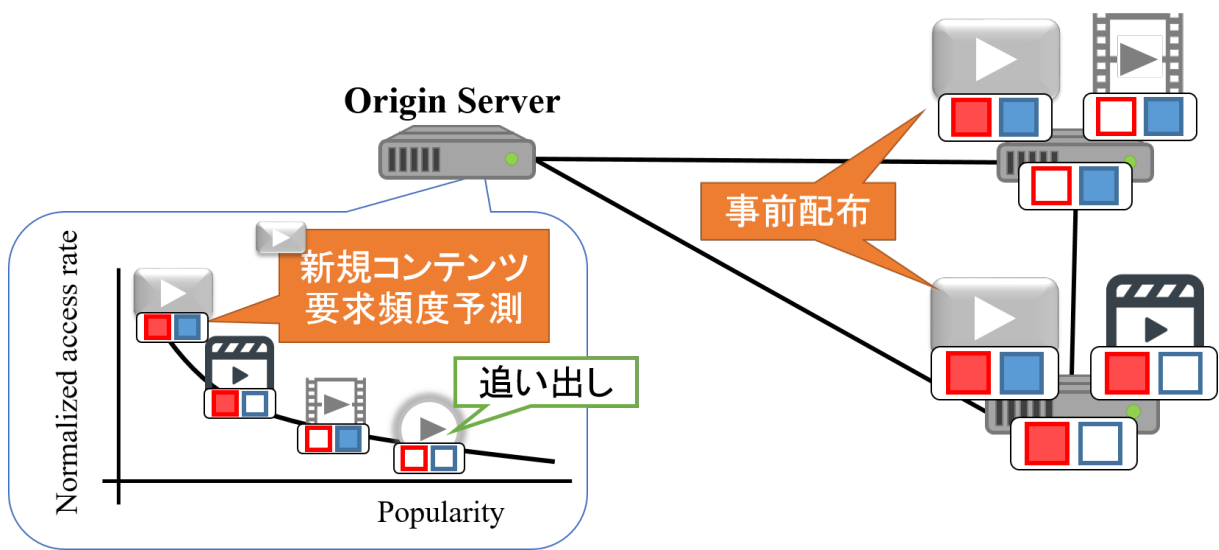
しかし、新規コンテンツの事前配布により、キャッシュ容量が圧迫されてしまうため、リリース直前に色の更新を行い、新規コンテンツを各キャッシュサーバに事前配布する。

図 4.1.2 にコンテンツ事前配布の 2 色の色キャッシュと本提案手法の動きを示す。図 4.1.2(a) に通常時の本提案方式を示す。通常時には 2 色の色キャッシュと同様の動きをする。高人気の動画に 2 つの色タグが付与されており、中低人気の動画には 1 つ色タグが付与されている。

図 4.1.2(b) にピークシフト時の本提案方式を示す。ピークシフトを行うために、コンテンツをキャッシュサーバに配置する。この新規コンテンツは、図 4.1.1 の N-1 から N 時点まではユーザから要求されず、実効キャッシュ容量を圧迫され、1 つの色タグがついているコンテンツが追い出される。N 時点以降には新規コンテンツがリリースされ、各コンテンツが予測した要求確率通りユーザから要求される場合、効果的なキャッシュ配置になる。



(a) 通常時



(b) ピークシフト時

図 4.1.2: 事前配布機能時の 2 色の色キャッシュの動き

4.2 評価

4.2.1 実験ネットワーク

§3 で提案した仕組みを導入し，以下の実験条件で本提案方式の通信量削減効果をシミュレーション実験により示す．

今回の実験では，新規コンテンツは最人気コンテンツが挿入され，それぞれのアクセス確率は各時間帯のガンマ分布によるものとする．

評価に用いたネットワークトポロジは先行研究 [16][17] で用いられていた，図 3.2.1 に示した日本の NTT ネットワークを模した環境を想定した．オリジンサーバは東京の位置にある黄色のノードに接続されている．上記の実験トポロジのパラメータは表 4.2 に示す．

各時間帯の要求の偏りは図 2.3.1, 各時間帯に要求されるリクエストの数は図 2.3.2, 各時間のコンテンツの入れ替わり割合は図 2.3.3 を参考にパラメータを設定した．

比較アルゴリズムは，キャッシュサーバなし (w/o cache), ModifiedLRU, LRU, 色情報が 1 日更新されない色キャッシュ制御 (Base Color), 1 時間前の情報を元にコンテンツをキャッシュする色キャッシュ制御 (Color), 本提案方式 (Push hybrid), 一時間前の情報を元にする色キャッシュと ModifiedLRU のハイブリッド制御 (Hybrid) の上記 6 つのアルゴリズムを用いた．

本提案方式利用時には結果のグラフ上に「ピークシフト」と記載する．それ以外の時間帯は通常時とし，Push hybrid キャッシュは Hybrid と同様に動作するものとする．本提案方式のピークシフト導入時間帯は，一日のうちユーザからの要求数が多い時間を 3 時間分選び実行した．

表 4.2: 実験ネットワークのノード数とリンク数

ノード数	リンク数	オリジンサーバ
55	144	Tokyo

4.2.2 内部トラフィックとオリジンサーバへの要求の通信量削減効果の検証

アクセスの変動が発生する状況における，時間ごとの通信量を §4.1 で示した環境で評価を行った．文献 [13] によると，IPTV において時間帯に応じて，要求数，要求の偏り，コンテンツの入れ替わる割合が異なる．

図 4.2.1(a) には比較アルゴリズム全ての結果を示す．図 4.2.1(b) には先行研究で提案されていたハイブリッドキャッシュと，本提案方式を比較する．図 4.2.1(a) によると，本提案手法はキャッシュ

表 4.1: 実験で利用した色の割り振り

	4 色	3 色	2 色	1 色
Color	5	25	85	285
Hybrid	5	25	85	245
Push Hybrid (事前保持)	5	25	85	165
Push Hybrid (通常時)	5	25	85	245

無しの状態と比較するとピーク時は約 5-6 割ほど通信量削減可能である。Base Color, ModifiedLRU はほぼキャッシュなしと同様の通信量削減効果となった。図 4.2.1(b) によると、通常時において Push hybrid と Hybrid は同等の機能のため通信量削減効果は同等である。ピークシフト時には、総ホップ数を約 15-30%程度削減可能であることがわかった。

図 4.2.2(a) には比較アルゴリズム全ての結果を示す。図 4.2.2(b) には先行研究 [9] で提案されていたハイブリッドキャッシュと、本提案方式を比較する。図 4.2.2(a) によると、本提案手法はキャッシュ無しの状態と比較するとピーク時は約 5-6 割ほど通信量削減可能である。Base Color, ModifiedLRU はほぼキャッシュなしと同様の通信量削減効果となった。図 4.2.2(b) によると、通常時において Push hybrid と Hybrid は同等の機能のため通信量削減効果は同等である。ピークシフト時には、オリジンサーバへの要求数を約 15-30%程度削減可能であることがわかった。

4.2.3 ピーク時の内部トラフィック・オリジンサーバの通信量削減効果の検証

新規動画のリリース時には、通常のキャッシュ制御において初期参照ミスが発生し、通信量・オリジンサーバへの要求数が高くなる。縦軸はそれぞれ正規化した内部トラフィックとオリジンサーバへの要求数を示す。横軸は時間を示し、5分間毎に結果をプロットした。毎単位時間ごとのコンテンツ要求は、北欧の IPTV の文献 [13] の図 2.3.1, 図 2.3.2, 図 2.3.3 を用い、表 4.3 で指定された 20,21, 22 時の要求数を 1/12 した回数分発生している。新規コンテンツはそれぞれ 21:00,22:00 にリリースされる。Push hybrid はリリースの 5 分前にコンテンツをキャッシュサーバに配布する。

図 4.2.3(a) に内部トラフィックの通信量、図 4.2.3(b) にオリジンサーバの要求数を示した。図 4.2.3(a) によると、ModifiedLRU は新規コンテンツの追加に強いキャッシュアルゴリズムであるため、通信量の変動は少ないが、通信量削減効果は低く 10 ほどしか通信量を削減することができない。20:55,21:55 時点について ModifiedLRU と Hybrid の通信量は上昇せず、Push hybrid の通信量が約 10%ほど上昇した。ピークシフト時の Push Hybrid の仕組みを用いた場合、予測が的中し、既にキャッシュサーバに配置されているため 15%ほど通信量削減効果が高い。

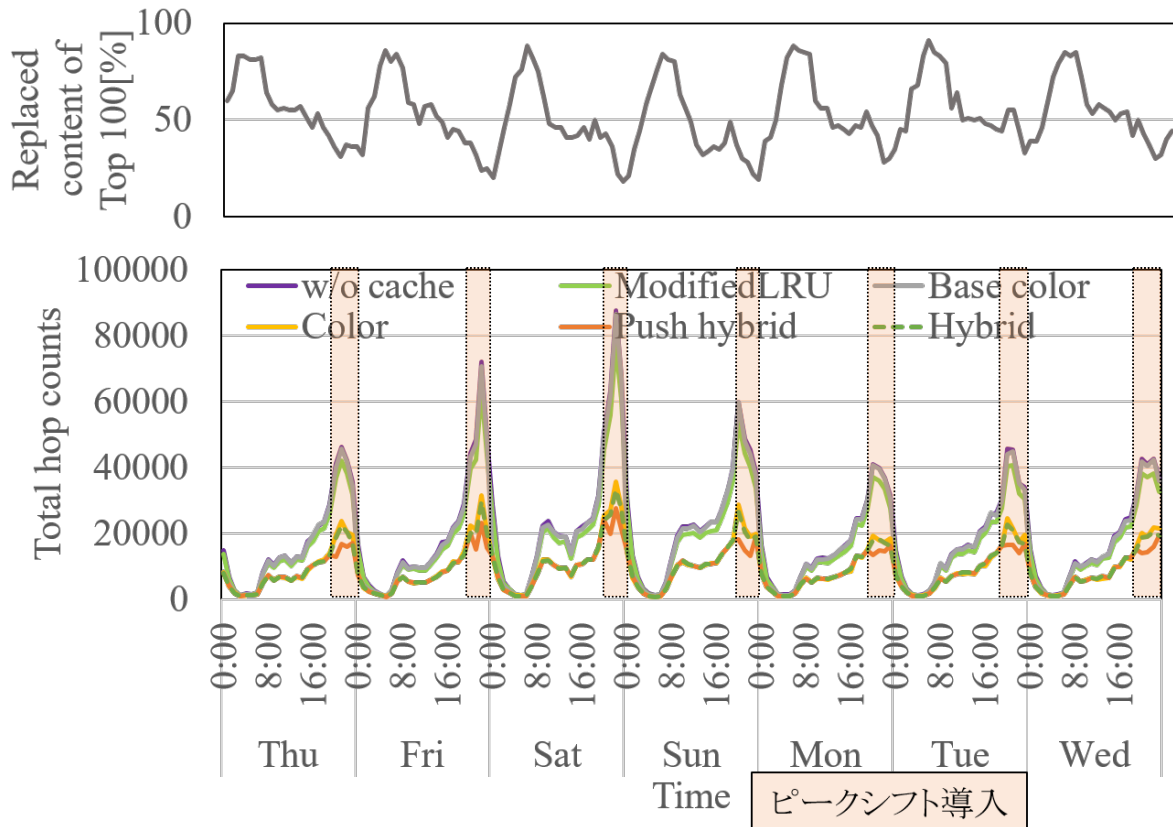
表 4.3: 実験で利用したパラメータ

	曜日	開始時刻	終了時刻
パラメータ	Saturday	20:30	22:25

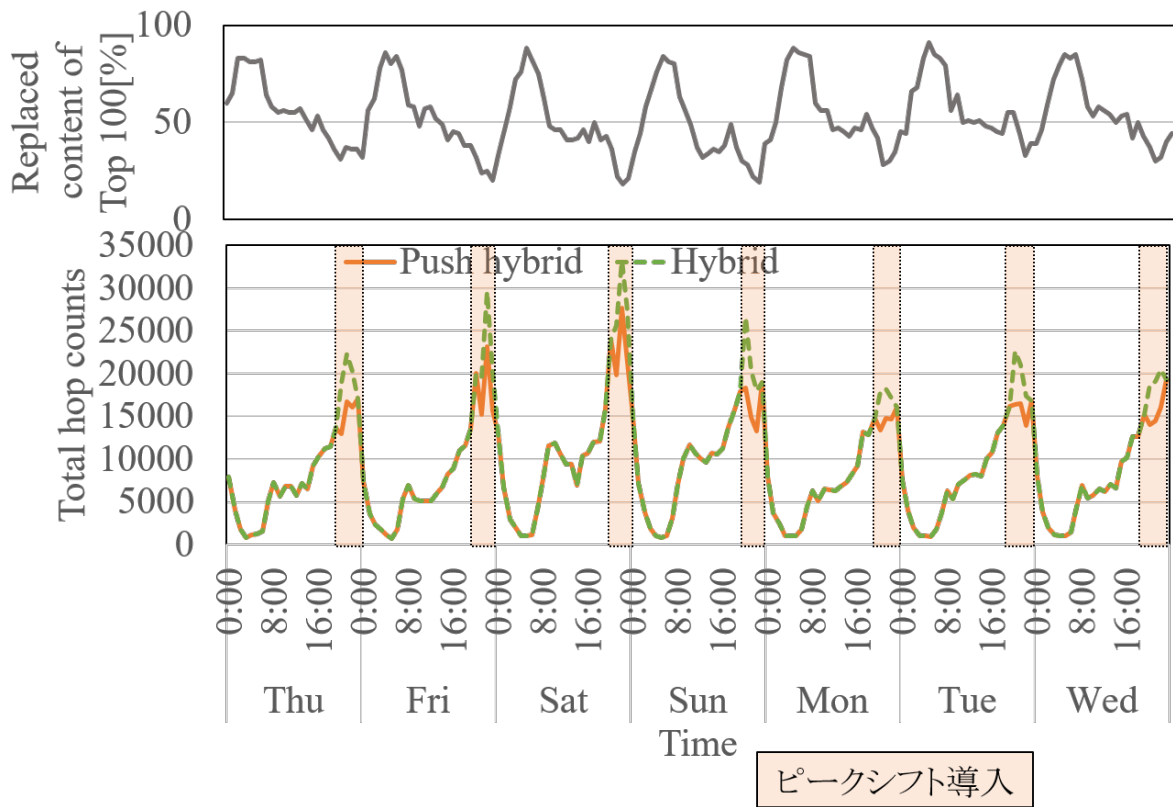
4.3 議論

4.3.1 内部トラフィックとオリジンサーバへの要求についての考察

本提案方式は、事前に効果的なキャッシュ配置を予測し、コンテンツをキャッシュサーバに配布することにより要求がピークに達する時間帯の通信量を削減する手法である。キャッシュサーバなしと比較するとピーク時の本提案手法の内部トラフィックの通信量削減効果は約 8 割程度であった。文献 [10] の Hybrid 方式は通信量削減効果が 9 割ほどであったにも関わらず、LRU のキャッシュ容量より多くのコンテンツが挿入される場合、通信量削減効果は約 5-6 割ほどである。この状況において、本提案方式は Hybrid 方式と比較しピーク時の内部トラフィックを約 15-30%ほど

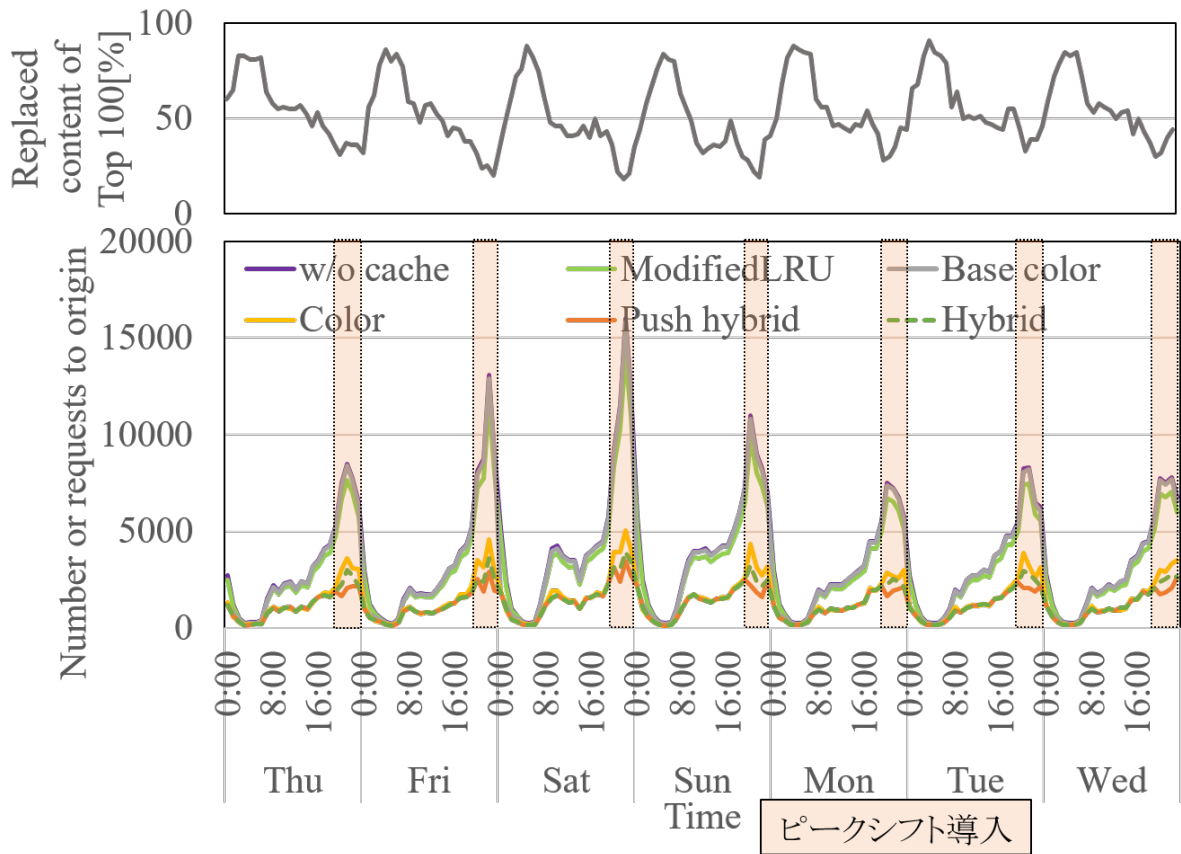


(a) 6つのアルゴリズムで比較

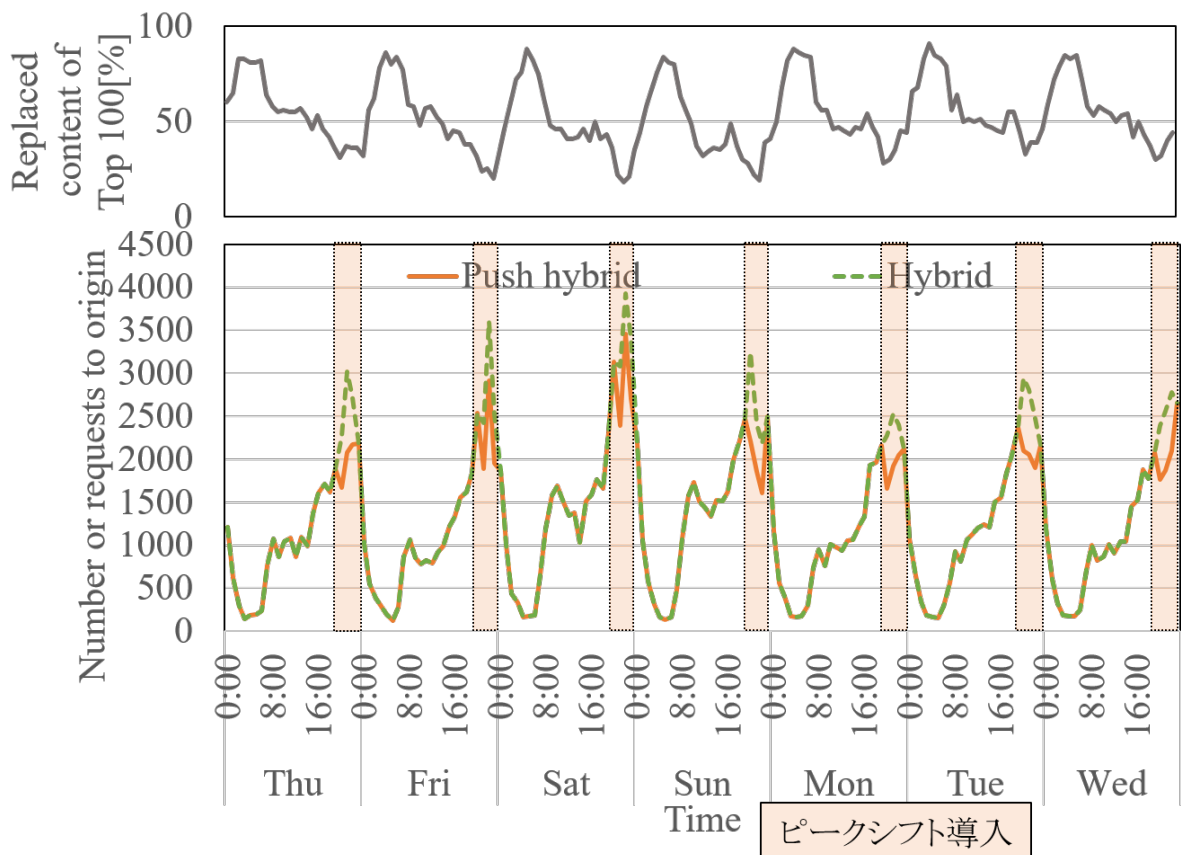


(b) Pushの有無で比較

23
図 4.2.1: 時間と総ホップ数の関係

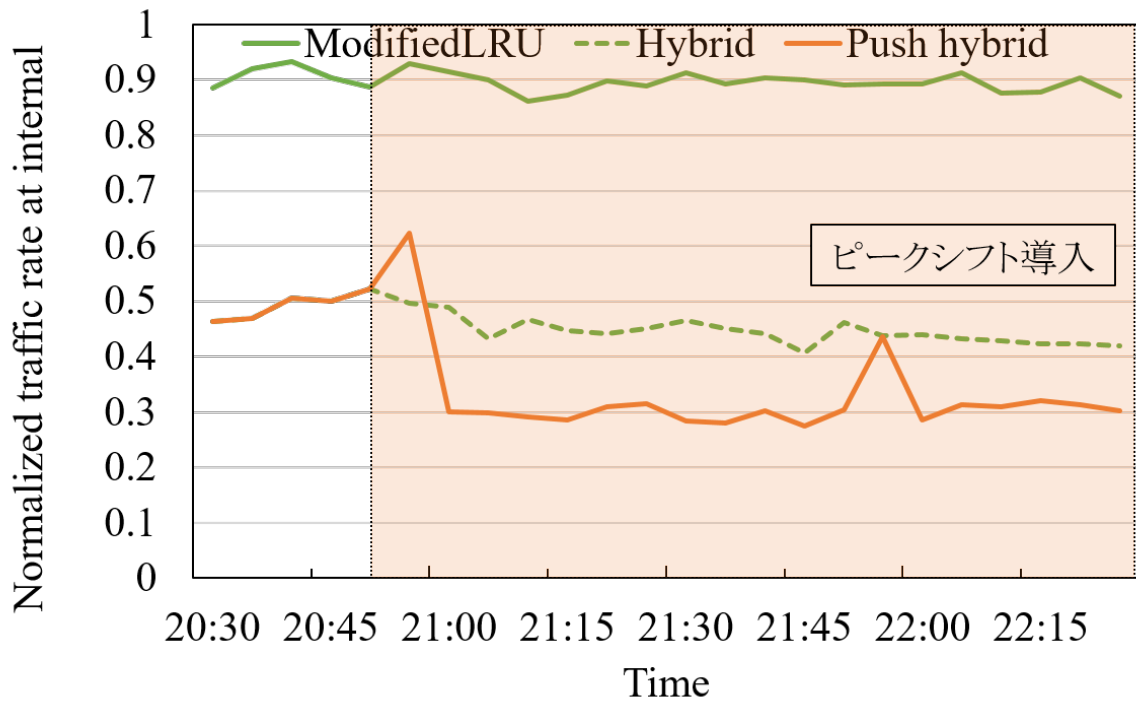


(a) 6つのアルゴリズムで比較

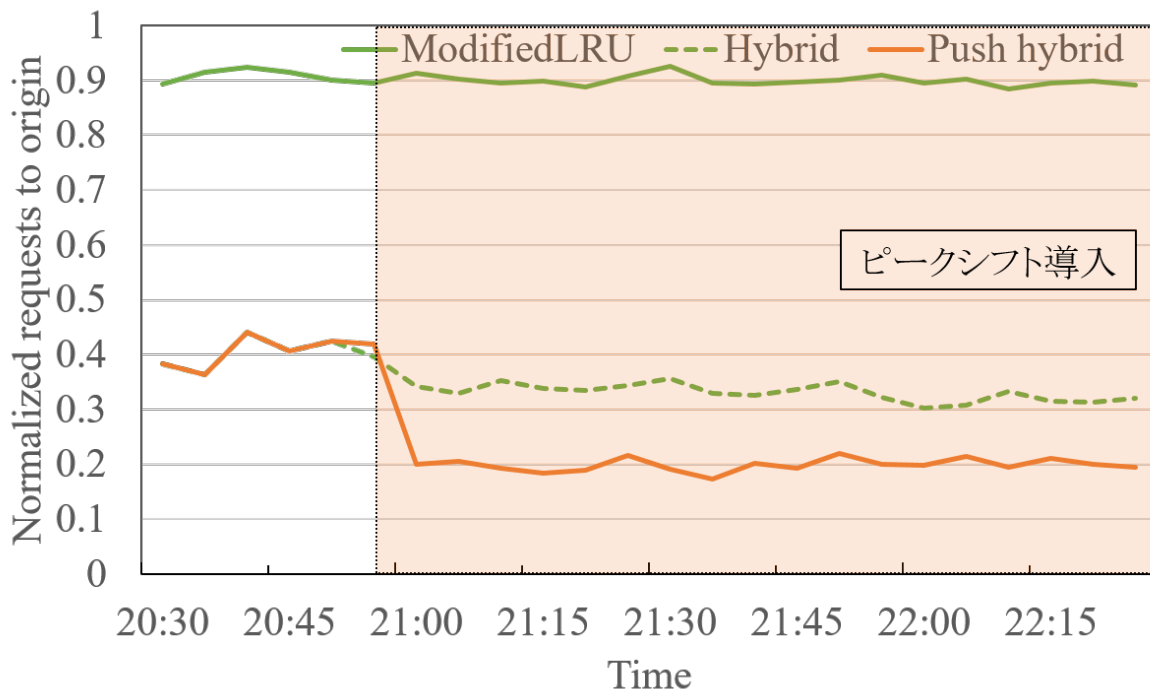


24
(b) Pushの有無で比較

図 4.2.2: 時間とオリジンサーバへの要求数の関係



(a) 内部トラフィック



(b) オリジンサーバ

図 4.2.3: 事前配布方式導入による通信量削減効果の検証

削減した。従来の手法と比較した場合、本提案方式を用いた場合の通信量は約 15-30%削減することができた。

4.3.2 ピーク時の要求の負荷分散についての考察

ピークシフト導入の有無による時間と正規化した通信量の関係を、内部トラフィックとオリジンサーバの要求数それぞれについて示した。Push hybrid は事前にコンテンツを配布時、ユーザからの要求されないコンテンツによるキャッシュ容量の圧迫、配布時に発生する通信量により内部トラフィックの通信量が 10%程度増加した。ピーク時にはオリジンサーバ・内部トラフィックと共に通信量削減効果がキャッシュなしと比較して約 80%、従来手法と比較して約 15%ほど通信量削減効果を示した。

一般的にオリジンサーバからコンテンツを取得する際のコストは高いと言われている。その前提において、本提案方式は要求数がピークに達する時間帯にキャッシュなしと比較して約 80%の通信量を削減可能である。従来方式と比較した場合、ModifiedLRU との比較では約 80%、予測なしの色キャッシュと比較して約 15%通信量を削減した。事前配信を導入したオリジンサーバへの要求数は内部トラフィックと異なり、配布前でも要求数の増加は小さい結果となった。この理由として、要求されやすいコンテンツは既にキャッシュサーバに保存されており、リリース前のコンテンツを配信する際にはコンテンツを 1 個につき 1 回配るだけであるため、オリジンサーバの負荷を増やさず、リリース後にも効果的なキャッシュ配置を適用し通信量の削減を行うことができる。

第5章 結論

本研究では、IPTV サービスで発生する通信量を削減するべく予測を用いて2つの通信量削減手法に取り組んだ。

1つ目の手法は、ユーザの要求の偏りを予測し、その偏りに合わせたコンテンツの配置割当を適用することで最大58%の通信量を削減した。提案方式は北欧のIPTVサービスの視聴傾向を元にアクセスパターンを生成し、日本のNTTネットワークを模した環境において通信量削減効果をシミュレーション実験により検証した。しかしながら、ユーザの要求数を評価項目に追加した場合、最も差が発生していた深夜の時間帯にはほとんど要求が発生しておらず従来方式との差が約5%であった。そこで、効率的に通信量を削減するべく、最もユーザの要求が多い時間帯には深夜時間帯と比較すると約40倍もの要求が発生している点に着目し、この時間帯の通信量を削減することを目指した。

2つ目に、動画配信事業者の経験則を用いた、新規コンテンツの人気度の予測を用いてコンテンツをキャッシュサーバに事前配布を行った。人気になるコンテンツを予測し事前に配布しておくことで、要求数がピークになる時間帯の負荷分散を可能にする仕組みを提案した。提案方式は評価パラメータに新規コンテンツの挿入・要求数を追加し、前述のネットワーク環境で評価を行った。ピークの時間帯はユーザの要求が統計的に取りやすく、人気になるコンテンツを予測可能という前提において、キャッシュなしと比較して最大約80%、従来手法と比較して最大約30%の通信量を削減した。

今後の課題として、より現実的な状況の再現を行い通信量削減効果を示すことが挙げられる。具体的な内容について、以下に示す。

- 実データを用いた予測
- 新規コンテンツアクセスパターンのモデル化
- 階層ネットワークへの拡張

参考文献調査・シミュレーションプログラムの作成を行い、より現実的なネットワーク環境の想定を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導と的確なご助言を頂きました，吉永努教授に感謝の意を表します。また，日常の議論を通じて研究面・技術面ともに多大なる知識や示唆を頂いた吉見真聡元助教に，感謝致します。また本研究を行うにあたって，研究についての議論・方向性の示唆など多大なる助言・添削を頂いた中島拓真博士，城間隆行先輩に，感謝いたします。最後に，研究生活を通じて様々な指摘，協力を下さいました吉永・策力木格研究室の皆様に，厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] The Zettabyte Era—Trends and Analysis. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visualnetworking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>, Accessed 2017-6-16.
- [2] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016-2021. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>, Accessed 2017-6-16.
- [3] Zhan Wang, Hai Jiang, Yi Sun, Jun Li, Jing Liu, and Eryk Dutkiewicz. A k-coordinated decentralized replica placement algorithm for the ring-based cdn-p2p architecture. In *Computers and Communications (ISCC)*, pp. 811–816. IEEE, 2010.
- [4] Danny De Vleeschauwer and Dave C Robinson. Optimum caching strategies for a telco cdn. *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 115–132, 2011.
- [5] Y. Zhou, L. Chen, C. Yang, and D. M. Chiu. Video Popularity Dynamics and Its Implication for Replication. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 17, No. 8, pp. 1273–1285, August 2015.
- [6] 中島拓真, 城間隆行, 吉見真聡, 策力木格, 吉永努. 動画の人気変動に追従する異種キャッシュ混在ネットワークの検討. 研究報告システム・アーキテクチャ (ARC), Vol. 2016, No. 42, pp. 1–6, 2016.
- [7] Zhe Li and Gwendal Simon. In a telco-cdn, pushing content makes sense. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 300–311, 2013.
- [8] Nattapong Kitsuwon, Hiroki Tahara, and Eiji Oki. Heuristic approach to determining cache node locations in content-centric networks. *IEEE Access*, 2017.
- [9] Takuma Nakajima, Masato Yoshimi, Celimuge Wu, and Tsutomu Yoshinaga. A light-weight content distribution scheme for cooperative caching in telco-cdns. In *Proceedings of The Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR'16)*, pp. 126–132. IEEE, 2016.
- [10] 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. 100, No. 12, pp. 2847–2856, 2017.
- [11] R. Fletcher. *Practical Methods of Optimization*. 2000.
- [12] Dominic JA Welsh and Martin B Powell. An upper bound for the chromatic number of a graph and its application to timetabling problems. *The Computer Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 85–86, 1967.

- [13] Henrik Abrahamsson and Mattias Nordmark. Program Popularity and Viewer Behaviour in a Large TV-on-demand System. In *The 2012 Internet Measurement Conference*, pp. 199–210. ACM, 2012.
- [14] X. Cheng, J. Liu, and C. Daleq. Understanding the Characteristics of Internet Short Video Sharing: A YouTube-Based Measurement Study. *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 15, No. 5, pp. 1184–1194, Aug 2013.
- [15] Nesrine Ben Hassine, Ruben Milocco, and Pascale Minet. Arma based popularity prediction for caching in content delivery networks. In *Wireless Days 2017*, pp. 113–120. ,IEEE, 2017.
- [16] Adolfo Arteta, Benjamín Barán, and Diego Pinto. Routing and wavelength assignment over wdm optical networks: a comparison between moacos and classical approaches. In *The 4th international IFIP/ACM Latin American conference on Networking*, pp. 53–63. ACM, 2007.
- [17] Jorge Crichigno and Benjamín Barán. Multiobjective multicast routing algorithm for traffic engineering. In *International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 301–306. ,IEEE, 2004.

発表論文

- [1] 千田 進, 城間 隆行, 中島 拓真, 策力木格 吉永 努 “アクセス変動予測を用いた分散協調キャッシュ制御” 信学技報, vol. 117, no. 153, pp. 51-56, Jul. 2017.