

# CDN キャッシュに対するキャッシュ汚染攻撃の最適化戦略

劉 甲奇<sup>†</sup> 上山 憲昭<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 立命館大学 情報理工研究科  
〒567-0876 大阪府茨木市岩倉町 2-150

<sup>††</sup> 立命館大学 情報理工学部  
〒567-0876 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: †jis0705vf@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

**あらまし** コンテンツ配信ネットワーク (CDN) の利用が広がる中、それに伴い、セキュリティの脅威も増大している。CDN の効率的な運用を確保し、破壊的な攻撃を防ぐために、防御戦略の最適化に関する研究が進んでいる。本稿は、攻撃者の視点から本問題にアプローチし、攻撃戦略の最適化にフォーカスする。最適化基準はサービスの平均応答時間を最大化することである。M/M/1 待機行列モデルと *Che* 近似を用いて階層的 CDN を構築し、遺伝的アルゴリズム (GA) を使用して CDN に対する攻撃戦略を最適化する。また、さまざまな CDN パラメタの下で最適な攻撃戦略とその影響を明らかにする。これらのデータを分析することで、CDN の脆弱性や攻撃者の最適化戦略の重要な特徴を明らかにする。

**キーワード** CDN, CPA, DDoS, LRU, キャッシュ

## Optimum Strategy of Cache Pollution Attacks Targeting CDN Caches

Jiaqi LIU<sup>†</sup> and Noriaki KAMIYAMA<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University  
2-150 Iwakuracho, Ibaraki, Osaka 567-8570

<sup>††</sup> College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University  
2-150 Iwakuracho, Ibaraki, Osaka 567-8570

E-mail: †jis0705vf@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

**Abstract** As the use of Content Delivery Network becomes increasingly widespread, they also face growing security threats. To ensure the efficient operation of CDN and prevent destructive attacks, extensive research focuses on optimizing defense strategies. This paper approaches the issue from an attacker perspective, aiming to optimize attack strategies to investigate attack characteristics. The optimization criterion is to maximize the average response time of services. We employ the M/M/1 queue model and *Che* approximation to construct a hierarchical CDN and use the genetic algorithm to optimize the attack strategies against the CDN. Our study reveals the optimal attack strategies and their impacts under various CDN parameters. By analyzing these data, we identify the vulnerabilities of CDN, and the significant characteristics exposed by attackers during the optimization process.

**Key words** CDN, CPA, DDoS, LRU, Cache

### 1. はじめに

コンテンツ配信ネットワーク (CDN) は、ユーザにコンテンツをより効率的かつ迅速に配信するために設計された、世界中に分散したキャッシュサーバネットワークである。CDN は、コンテンツを世界中の戦略的に配置された複数のアクセスポイントにキャッシュすることで、これを実現する。CDN は、コンテ

ントのコピーを異なる地理的な場所に分散させた複数のキャッシュサーバに配布し、ユーザがコンテンツを要求したとき、最寄りのキャッシュサーバから提供することで、データが移動する距離を短縮し、配信プロセスを加速させる。Grand View Research の報告書によると、2023 年の世界 CDN 市場規模は 213.6 億ドルと評価され、2024 年から 2030 年にかけて年平均成長率 (CAGR) は 17.7 % になると予測されている。この成

長は、特にデジタルメディア、ストリーミングサービス、e コマースプラットフォームの普及によるオンラインコンテンツの消費増加によって主導されている。

CDN の主なコンポーネントには、ユーザに近い場所に配置され、キャッシュされたコンテンツを迅速に配信するエッジ (キャッシュ) サーバが含まれる。キャッシングは、最近アクセスされたコンテンツを一時的に保存して再取得にかかる時間を最小限に抑える。また、オリジンサーバはコンテンツの元のソースであり、エッジサーバに要求されたコンテンツがキャッシュされていない場合のみアクセスされる。キャッシングは CDN の重要な要素だが、特定の脆弱性も引き起こす。CDN は、他のサーバと同様に分散型サービス妨害 (DDoS) 攻撃のリスクに直面するだけでなく、キャッシュ固有の脅威であるキャッシュ汚染攻撃 (CPA) にも特に脆弱である。CDN のキャッシュが侵害されると、そのパフォーマンスや応答時間は大きく低下する。そのため、CPA から CDN を守るための効果的な対策が重要である。

そこで筆者らは [?] で、攻撃者の視点から攻撃の特性を分析したが、攻撃者が攻撃戦略を最適化した場合の CDN への影響については分析していない。そこで本稿では階層型 CDN モデルを攻撃対象とし、遺伝的アルゴリズムを使用してさまざまなシナリオにおける攻撃者の戦略を最適化し、CDN の平均応答時間を最大化することを目的とする。得られた最適な攻撃戦略から、攻撃者の行動とその攻撃が CDN に与える影響を明らかにする。

2. 節で、CDN をターゲットにしたキャッシュ攻撃に関する関連研究をまとめる。3. 節で、要求 CDN の性能評価モデルを説明する。4. 節で階層型 CDN モデルを紹介し、このモデルに適用した性能評価式を導出する。5. 節で、遺伝的アルゴリズム (GA) の実装方法について詳述し、6. 節で、計算機シミュレーションによる数値評価結果を分析する。

## 2. 関連研究

CDN に関する主な研究は、サービスの効率とセキュリティを向上させるために、キャッシング戦略の強化に焦点を当ててきた。CDN におけるキャッシュ管理の重要性を考慮すると、キャッシュをターゲットにした攻撃、特にキャッシュ汚染攻撃 (CPA) は、ますます注目を集めている。CPA を軽減するために、さまざまな方法が提案されている。Zhang らのアプローチでは、フィルタを使用してキャッシュ汚染をブロックし、有害な要求を特定して除外することで、キャッシュの信頼性を向上させる [?]. Zhou らは、キャッシュ分割を用いてこの問題に対処し、異なる種類のコンテンツのキャッシュ空間を分けることで、高人気コンテンツと低人気コンテンツの干渉を減らす [?]. Park らは、ランダム検査を利用して CPA の試みを検出し、要求を定期的に調べてキャッシュの悪用を識別し、対処することで、最終的に CDN のキャッシュ操作に対する耐性を高める [?].

複数のキャッシュサーバを統合した階層型 CDN は、CDN のスケーラビリティ、効率、ネットワーク遅延に対する耐性を向上させる効果的な方法として提案されている。特に階層型 CDN モデルは、エッジサーバと中央キャッシュサーバとに負荷を分散させることにより、分散型サービス妨害 (DDoS) 攻撃の影響を効果的に減少させる [7] [?] [?]. [?] では、階層型 CDN が DDoS 攻撃の全体的なサービスへの影響を効果的に軽減できるだけでなく、CPA に対する一定の防御も提供できることを

明らかにした。これは、人気のあるコンテンツを複数のキャッシュ層に分散させることで、キャッシュ汚染がオリジンサーバに届く確率を減らすためである。

*Che* 近似モデル [?] は、階層型 CDN やさまざまなキャッシング戦略におけるキャッシュヒット率を予測するために広く利用されている。Zipf の法則を用いてコンテンツの人気をモデル化することにより、*Che* 近似は、さまざまな条件下でのキャッシュパフォーマンスと応答時間を正確に推定する。*Che* 近似は、より広範囲のキャッシング戦略や階層型 CDN にも適用できることが証明されている [?].

これらの研究を基に、本稿では最適な CPA 戦略をモデル化し、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて階層型 CDN における CPA の影響を複数の CDN パラメータにわたって評価する。計算機シミュレーションを通じて、ネットワーク遅延、キャッシュ容量、Zipf のパラメータなどが CPA の平均応答時間に与える影響を分析する。本稿は階層型 CDN の耐性に対する CPA の潜在的な影響を理解することに貢献し、CDN キャッシュ管理におけるより堅牢な防御の開発に向けた洞察を提供する。

## 3. 分析モデル

多くの CDN では、ユーザの要求はポアソン到着過程に従う [5]. ユーザの体験の観点から、CDN のパフォーマンスは平均応答時間で表される。さまざまな人気のコンテンツに対する要求の分布は Zipf の法則に従うことが示されている [6].

ここで、 $\mu$  は指数分布に従う平均サービス時間、 $M$  は CDN 内で提供されるコンテンツの数、 $\lambda_i$  はコンテンツ  $i$  の要求に対するポアソン到着率である。これに基づき、M/M/1 キューイングモデルの公式を用いて、CDN の平均処理時間  $W$  は以下のよう表される。

$$W = \frac{1}{\mu - \sum_{i=1}^M \lambda_i} \quad (1)$$

基本的な CDN モデルは要求 3 つの要素、クライアント、エッジサーバ、オリジンサーバに簡略化できる (図 1)。オリジンサーバは CDN 上で利用可能なすべてのコンテンツを保存しており、エッジサーバはキャッシュ置換ポリシーに基づいてその一部をキャッシュしている。LRU は、最も最近使用されていないコンテンツをキャッシュから削除する、CDN で一般的なキャッシュ置換ポリシーである [?] ため、すべてのキャッシュが LRU を採用していると仮定する。

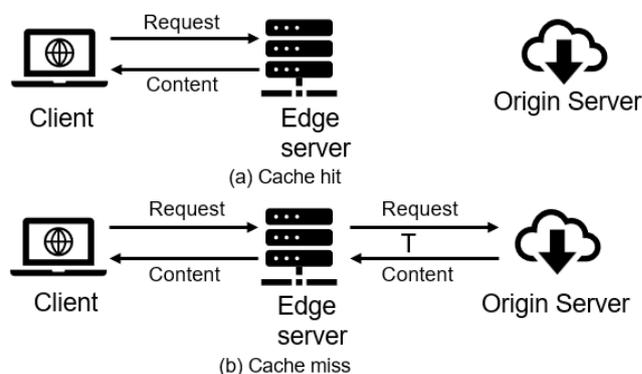


図 1 CDN の処理フロー

クライアントが特定のコンテンツを CDN から要求すると、

要求は DNS サーバによってエッジサーバに転送される。要求されたコンテンツがエッジサーバにキャッシュされている場合、これをキャッシュヒットと呼び、エッジサーバはコンテンツを直接ユーザに配信する。しかし、コンテンツがエッジサーバにキャッシュされていない場合、これをキャッシュミスと呼び、エッジサーバは要求をオリジンサーバに転送する。その後、オリジンサーバはコンテンツをエッジサーバに送信し、エッジサーバがそれをクライアントに配信する。

ネットワーク遅延は平均応答時間の重要な部分を占めている。しかし、各ユーザのネットワーク環境が異なるため、本稿ではサーバ間の遅延のみに焦点を当てる。基本モデルでは、エッジサーバとオリジンサーバ間のネットワーク遅延を  $T$  と定義する。式 (1) に基づいて、エッジサーバの平均処理時間を  $W_e$ 、オリジンサーバの平均処理時間を  $W_o$  と定義する。したがって、キャッシュヒットの場合、平均応答時間は  $W_e$ 、キャッシュミスの場合は  $W_e + W_o + T$  となる。

キャッシュヒット率はコンテンツの人気によって異なるため、コンテンツ  $i$  のキャッシュヒット率を  $h_i$  と定義する。このとき、コンテンツ  $i$  の平均応答時間  $W_i$  を次のように表現できる：

$$W_i = h_i W + (1 - h_i)(W + T) \quad (2)$$

コンテンツ  $i$  のエッジサーバ上でのキャッシュヒット率  $h_i$  を推定するために  $Che$  近似を使用する [?]。  $C$  はエッジサーバのキャッシュ容量を表し、これは最大のコンテンツ数を意味する。  $Che$  近似によれば、キャッシュヒット率  $h_i$  は次のように表現される：

$$h_i \approx 1 - e^{-q_i t_c} \quad (3)$$

ただし  $t_c$  はキャッシュサーバの特徴時間であり、次式で計算できる：

$$\sum_{i=1}^M h_i = C. \quad (4)$$

#### 4. 階層型 CDN モデル

階層型 CDN は、1つのオリジンサーバと複数のキャッシュサーバの層から構成されており、本稿では特に2層キャッシュサーバモデルに焦点を当てる。キャッシュサーバの層でユーザに近い層をエッジサーバ、オリジンサーバに近い層を中央サーバと呼ぶ。

一般的に、1つの地域には大きなキャッシュ容量を持つ中央サーバがあり、オリジンサーバと複数のエッジサーバに接続されている。エッジサーバは、比較的小さいキャッシュ容量を持ち、中央サーバにのみ接続される。ユーザ要求が DNS サーバによって送信されると、エッジサーバに送られる。キャッシュヒットの場合、コンテンツは直接ユーザにエッジサーバから配信される。キャッシュミスの場合、要求はエッジサーバから地域の中央サーバに転送される。中央サーバはより大きなキャッシュ容量を持ち、通常はキャッシュされたコンテンツを要求してきたエッジサーバに配信する。しかし、もし中央サーバにキャッシュミスが発生した場合、要求はさらにオリジンサーバに転送される。

図2に示すように、CDN モデルは5つの地域—A, B, C, D, E—から構成され、各地域は異なる規模のユーザに基づいて異なる数のエッジサーバ（それぞれ5, 10, 15, 20, 25）が

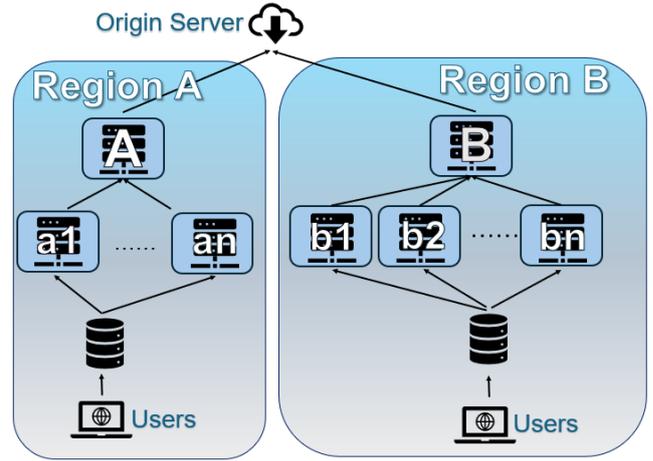


図2 2つの地域から構成される階層的 CDN モデル

存在する（図では2つの地域のみ示している）。各地域は独立して運用されているが、類似したコンテンツ人気のトレンドを共有し、すべての地域は同じオリジンサーバに接続されている。DNS サーバがランダムアルゴリズムを用いてユーザ要求を地域内の1つのエッジサーバに転送すると仮定する。また、エッジサーバと中央サーバ間のネットワーク遅延を  $T_1$ 、中央サーバとオリジンサーバ間の遅延を  $T_2$  と定義する。

本モデル内では、3つの異なる要求シナリオが発生する可能性がある。例えば、地域 A のユーザの要求時、エッジサーバでキャッシュヒットが発生した場合、平均応答時間は  $r_e^A$  であり、 $r_e^A = W_{an}$  となり、 $W_{an}$  は任意のエッジサーバの平均応答時間を示す。もし中央サーバでキャッシュヒットが発生した場合、平均応答時間は  $r_c^A$  となる。さらにエッジと中央サーバの両方でキャッシュミスが発生した場合、平均応答時間は  $r_o^A$  となる。 $r_c^A$  と  $r_o^A$  は次のように導出できる：

$$r_c^A = W_{an} + W_A + T_1 \quad (5)$$

$$r_o^A = W_{an} + W_A + W_o + T_1 + T_2 \quad (6)$$

地域 A 内でのエッジサーバと中央サーバでのコンテンツ  $i$  のキャッシュヒット率を各々、 $h_i^{an}$ 、 $h_i^A$  と定義する。全体の平均応答時間  $R$ 、地域 A のすべてのユーザに対する加重平均応答時間  $R^A$  を用いて、コンテンツ  $i$  を要求した地域 A 内のユーザの平均応答時間  $R_i^A$  は次式で計算できる：

$$R_i^A = h_i^{an} r_e^A + (1 - h_i^{an}) h_i^A r_c^A + (1 - h_i^{an})(1 - h_i^A) r_o^A \quad (7)$$

さらに、要求平均応答時間  $R^A$  は次式で得られる：

$$R^A = \frac{\lambda_i^A R_i^A}{\sum_{i=1}^M \lambda_i^A} \quad (8)$$

#### 5. CDN キャッシュに対する最適攻撃法

CPA が CDN に与える潜在的な脅威を分析するために、攻撃者が攻撃の効果を最大化させる最適攻撃法を考える。最適化には遺伝的アルゴリズム (GA) を使用する。GA は、自然進化の理論に触発された探索アルゴリズムの一群であり、自然選択と再生のプロセスを模倣することにより、さまざまな探索、最適化、学習の問題に高品質な解決策を提供することができる。さらに GA は自然進化に類似しているため、従来の探索および最適化方法が直面する特定の制限を克服することができ、特に多

数のパラメタと複雑な数式を含む問題において優れた結果をもたらすため、広く使用されている [?] [?].

**Algorithm 1** Optimum allocation of sending rate of attack packets on each CDN cache server

- 1: Randomly sets  $s_i^n$  as the initialized chromosome, which  $0 < s_i^n < 1$
- 2: To achieve crossover, sets any two chromosomes as a group and randomly exchange of  $s_i^n$  in groups
- 3: To achieve mutation, randomly changes a  $s_i^n$ , which  $0 < s_i^n < 1$
- 4: To achieve selection, adds attacker's request to the normal request and calculate the  $R$  as fitness and selects the best chromosomes from the parents and children
- 5: Repeats steps 2, 3 and 4 until  $N$  generations

$\lambda_T$  を攻撃者が生成できる総要求率,  $s_i^n$  を地域  $n$  でコンテンツ  $i$  に送信する攻撃者の要求の割合と定義する. 要求  $\lambda_i^n$  は次式で表現できる:

$$\lambda_i^n = \frac{s_i^n}{\sum_{n=A}^E \sum_{i=1}^M s_i^n} \quad (9)$$

最適な攻撃戦略は, 攻撃者が様々な地域の異なるサーバに限られたリソースをどのように配分するかを意味している. 本稿では GA の各遺伝子のフィットネス値として, 式 (8) の  $R_A$  の全地域にわたる平均値  $R$  を用いる.

## 6. 数値評価

数値評価で用いる CDN の各種パラメタの設定値を表 1 にまとめる. すべてのコンテンツがサーバ上で同じ量のキャッシュスペースを占め, 異なるコンテンツの要求レートは, Zipf の法則に基づいてコンテンツの人気に応じて計算される.

表 1 シミュレーションパラメタ

パラメタ	値
提供コンテンツ数, $M$	100
エッジサーバのキャッシュサイズ	20
中央サーバのキャッシュサイズ	50
Zipf 法のパラメタ $\theta$	4
各地域のエッジサーバ数	5
各エッジサーバへの要求レート, $\lambda$	30 /second
エッジサーバの平均サービス時間, $1/\mu_1$	10 ms
中央サーバの平均サービス時間, $1/\mu_2$	2 ms
オリジンサーバの平均サービス時間, $1/\mu_o$	1 ms
エッジサーバ・中央サーバ間の遅延, $T_1$	500 ms
中央サーバ・オリジンサーバ間の遅延, $T_2$	300 ms

### 6.1 攻撃の定義と評価基準

CPA (キャッシュ汚染攻撃) の目的は, 低人気コンテンツを大量に要求してキャッシュを汚染し, 高人気コンテンツのキャッシュヒット率を低下させることで, 正常ユーザの平均応答時間を増加させ要求する. CPA は正当な要求を送信する攻撃なので, CDN は攻撃者から送信された要求を検知できない. 平均応答時間のわずかな変化でもユーザ体感品質に大きな影響を与える可能性があるため, 平均応答時間の増加率 (GR) を評価基準として用いる. 最初に攻撃者はすべてのコンテンツにランダムに要求を送信し, GA に基づいて攻撃戦略を最適化し続ける. 最

終的に, 最適な攻撃戦略に基づいて評価する. 攻撃者が単一の地域  $A$  (5 つのエッジサーバから構成) をターゲットにした場合,  $R_A^n$  を攻撃がない場合の地域  $A$  の平均応答時間,  $R_A$  を攻撃時の平均応答時間とすると, 地域  $A$  に対する攻撃時, GR を以下の式で定義する:

$$GR = \frac{R_A - R_A^n}{R_A^n} \quad (10)$$

### 6.2 エッジサーバ数の影響

本節では, 他のすべてのパラメタを一定に保ち, 攻撃された地域のエッジサーバ数のみを変化させ, 異なる攻撃能力における GR の変化を評価する. 地域内の正常ユーザからの要求レートはエッジサーバ数によって異なる. CDN のエッジサーバは通常, その地域のユーザ数に基づいて展開されるため, 各地域の平均要求到着率はエッジサーバ数の 30 倍と仮定する.

図 3 に, 各地域のエッジサーバ数が 5 つの各場合の GR を, 攻撃者の総攻撃能力に対してプロットする. 画像の横軸の Attack capacity は攻撃者の攻撃能力を表している. つまり, 攻撃者が同じ時間に送信できる最大要求数である. 例えば, Attack capacity が 150 である場合, 攻撃者は攻撃対象地域に対して毎秒 150 の要求に送信する.

エッジサーバが少ない地域は同じ攻撃能力の CPA に対してより脆弱である. さらに, これらの地域では GR が最も速い速度で増加する. この結果からわかることは, 同じ攻撃能力のもとで正常ユーザが多い地域ほど, 攻撃の影響が低下するということである. しかし, 攻撃能力が通常ユーザの要求レートに対して非常に小さい場合でも, 一定の GR が観測されることに注意が必要である.

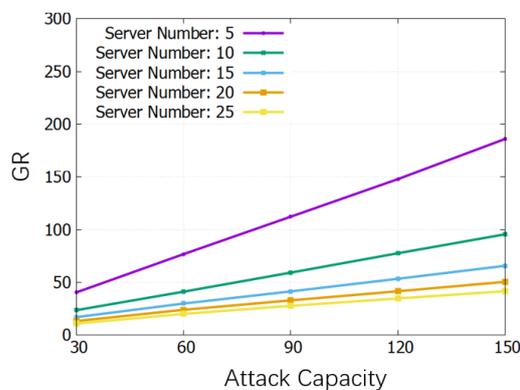


図 3 エッジサーバ数が GR に与える影響

### 6.3 遅延の影響

表 2 に示すように, 異なるサーバ間の遅延  $T_1$  と  $T_2$  の設定値について 5 つの評価シナリオを考える. 遅延  $T_1$  と  $T_2$  は常に相互に比例するようにした. 図 4 に同様に結果を示すが, 遅延が大きいほど GR が増加し, さらに攻撃能力の増加に伴う GR の増加率も高いことから, より CPA の影響が大きくなる.

表 2 遅延の設定シナリオ

遅延	$T_1$	$T_2$
L1	60 ms	100 ms
L2	120 ms	200 ms
L3	180 ms	300 ms
L4	240 ms	400 ms
L5	300 ms	500 ms

健全な CDN では、ほとんどの要求はエッジサーバによって処理され、中央サーバにルーティングされる要求はごくわずかである。そのためほとんどの要求は遅延  $T_1$  を経験し、少数の要求のみがオリジンサーバに送信され、 $T_1$  と  $T_2$  の両方を経験する。しかし、大容量の CPA の際には、人気の高いコンテンツのキャッシュヒット率が低下し、これらの要求は遅延  $T_1$ 、あるいは場合によっては  $T_2$  を経験することになる。

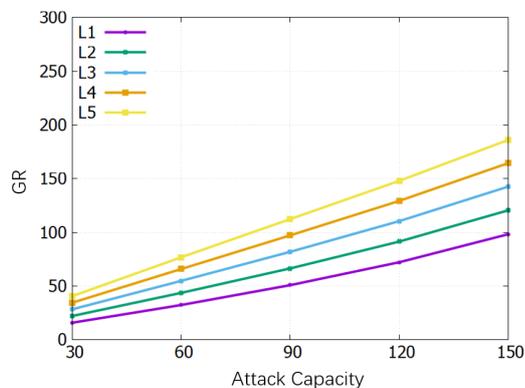


図 4 遅延が GR に与える影響

#### 6.4 Zipf のパラメタの影響

Zipf の分布のパラメタ  $\theta$  は、コンテンツの人気に基づく要求の分布に影響を与える。この  $\theta$  が高いほど、要求は高人気のコンテンツに集中し、逆に  $\theta$  が低いほど、要求は分散する。図 5 に  $\theta$  の 5 つの各場合における GR を攻撃容量に対して示す。  $\theta$  が小さなほど、多数のコンテンツをキャッシュする必要があり、攻撃者はキャッシュ容量の一部を汚染するだけで CDN の性能の大きく低下させることが可能である。

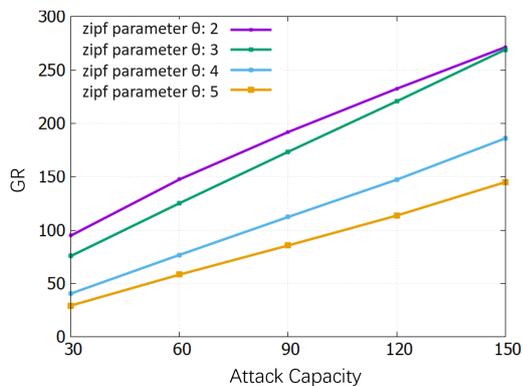


図 5 Zipf のパラメタが GR に与える

#### 6.5 エッジサーバのキャッシュ容量の影響

図 6 に、エッジキャッシュの 4 つの各サイズにおける GR を攻撃容量に対して示す。人気の高いコンテンツはキャッシュに格納され、キャッシュスペースが大きいほど攻撃者に汚染される耐性が高くなる。したがって、攻撃能力が小さい場合、キャッシュ容量によって GR の差が小さくなる。キャッシュ容量を増加させることで GR は低下し、CPA に対する耐性を向上させることができる。

#### 6.6 中央サーバのキャッシュ容量の影響

図 7 に、中央サーバの 4 つの各サイズにおける GR を攻撃容量に対して示す。エッジサーバと比較して、中央サーバの

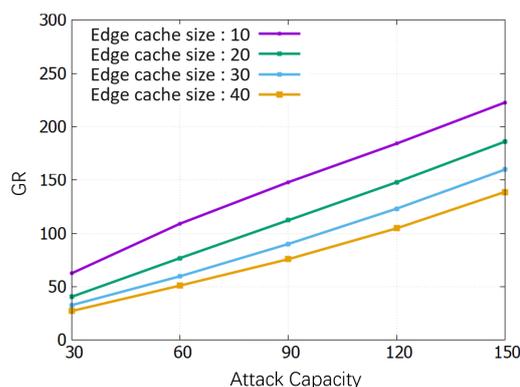


図 6 エッジサーバのキャッシュ容量が GR に与える影響

キャッシュ容量が GR に与える影響は小さい。階層型 CDN ではオリジンサーバに送られる要求が少数であり、 $T_1$  が  $T_2$  よりも GR に与える影響が大きいためである。中央サーバのキャッシュ容量を減らすと、オリジンサーバに送られる要求がわずかに増え、 $T_2$  という少量の遅延が付加されるだけである。したがって、中央サーバのキャッシュ容量は GR に対してほとんど影響を与えない。

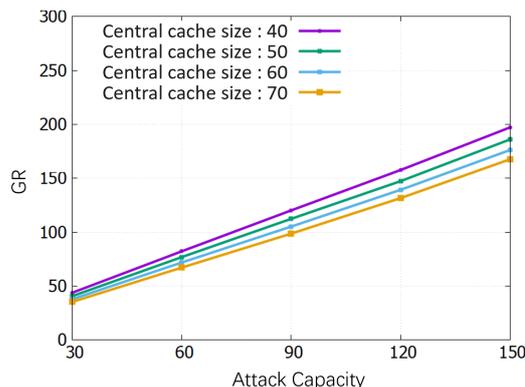


図 7 中央サーバのキャッシュ容量が GR に与える影響

## 7. まとめ

本稿では CPA が CDN の性能に与える影響を明らかにするため、平均応答時間が最大となるよう、攻撃者が総攻撃容量を各エッジキャッシュに対して GA を用いて最適配分するアルゴリズムを提示した。そして計算機シミュレーションにより、各種条件が CPA の脅威に与える影響を明らかにした。エッジサーバが少ない地域は CPA 攻撃に対して脆弱であり、同じ攻撃容量の下でも GR が高くなることが明らかとなった。特にネットワーク遅延が大きいと、攻撃の影響が悪化し、より多くの要求がエッジサーバから中央サーバやオリジンサーバに転送される。さらに要求分布の偏りが強いほど、低攻撃容量で高い GR が観察される。エッジサーバのキャッシュ容量を増大させることで CPA の影響を低減することが可能である反面、中央サーバのキャッシュ容量は、階層型 CDN でオリジンサーバに到達する要求が限られているため、GR への影響はほとんどない。供するものである。

## 謝 辞

本研究成果は JSPS 科研費 23K21664, 23K21665, 23K28078

の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] Grand View Research. (2023). Content Delivery Network Market Size & Share Report, 2030. Grand View Research. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/content-delivery-networks-cnd-market?form=MG0AV3>
- [2] Emma Ryan, "Website Load Time Statistics: Why Speed Matters in 2024", Website Builder Expert, 2021. [Online]. Available: <https://www.websitebuilderexpert.com/building-websites/website-speed>. [Accessed: Jan- 2024]
- [3] L. Yao, Z. Fan, J. Deng, X. Fan and G. Wu, "Detection and Defense of Cache Pollution Attacks Using Clustering in Named Data Networks," in IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 17, no. 6, pp. 1310-1321, 1 Nov.-Dec. 2020
- [4] K. Kim, Y. You, M. Park and K. Lee, "DDoS Mitigation: Decentralized CDN Using Private Blockchain," International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) 2018
- [5] A. O. Al-Abbasi and V. Aggarwal, "EdgeCache: An optimized algorithm for CDN-based over-the-top video streaming services," IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Honolulu, HI, USA, 2018, pp. 202-207, doi: 10.1109/INFOCOMW.2018.8407016.
- [6] P. Yadav and S. Kar, "Evaluating the Impact of Region Based Content Popularity of Videos on the Cost of CDN Deployment," 2020 National Conference on Communications (NCC), Kharagpur, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/NCC48643.2020.9056021.
- [7] Sankalp Basavaraj, "Multi-Cloud, Multi-CDN: The Future of the Internet", Medium, 2022. [Online]. Available: <https://labs.ripe.net/author/sankalp-basavaraj/multi-cloud-multi-cdn-architecture-a-deceptive-future-of-the-internet>.
- [8] Z. Zeng and H. Zhang, "A Study on Cache Strategy of CDN Stream Media," 2020 IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC) 2020
- [9] J. Zhang, K. -z. Mei and J. -z. Zhao, "Filtering Cache Pollution by Using Replacement Operation Based on Confidence Estimation," 2010 IEEE Fifth International Conference on Networking, Architecture, and Storage, Macau, China, 2010, pp. 386-392, doi: 10.1109/NAS.2010.16.
- [10] J. Zhou, J. Luo, L. Deng and J. Wang, "Cache Pollution Prevention Mechanism Based on Cache Partition in V-NDN," 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Chongqing, China, 2020, pp. 330-335, doi: 10.1109/ICCC49849.2020.9238838.
- [11] H. Park, I. Widjaja and H. Lee, "Detection of cache pollution attacks using randomness checks," 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC), Ottawa, ON, Canada, 2012, pp. 1096-1100
- [12] Y. Wen, Y. Chen, M. -L. Shao, J. -L. Guo and J. Liu, "An Efficient Content Distribution Network Architecture Using Heterogeneous Channels," in IEEE Access, vol. 8, pp. 210988-211006, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3037164.
- [13] H. Xing et al., "Hierarchical Sketch: An Efficient, Scalable and Latency-aware Content Caching Design for Content Delivery Networks," 2024 IEEE/ACM 32nd International Symposium on Quality of Service (IWQoS), Guangzhou, China, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWQoS61813.2024.10682952.
- [14] J. Liu and N. Kamiyama, "Investigating Impact of DDoS Attack and CPA Targeting CDN Caches," 2024 IEEE/IFIP International Workshop on Analytics for Network and Service Management (AnNet), Seoul, Korea, May 2024
- [15] H. Che, et al., "Hierarchical Web Caching Systems: Modeling, Design and Experimental Results," IEEE J. Selected Areas of Commun., vol.20, no.7, Sep. 2002
- [16] C. Fricker, P. Robert and J. Roberts, "A versatile and accurate approximation for LRU cache performance," 2012 24th International Teletraffic Congress (ITC 24), Krakow, Poland, 2012, pp. 1-8.
- [17] P. Guo, X. Wang and Y. Han, "A Hybrid Genetic Algorithm for Structural Optimization with Discrete Variables," 2011 International Conference on Internet Computing and Information Services, Hong Kong, China, 2011
- [18] N. Rikatsih and W. F. Mahmudy, "Adaptive Genetic Algorithm Based on Crossover and Mutation Method for Optimization of Poultry Feed Composition," 2018 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET), Malang, Indonesia, 2018