

DNS 探索グラフによる IPv4/IPv6 トランスポートを考慮した DNS 委譲構造の分析

浅井 大史 福田 健介 江崎 浩

DNS (Domain Name System) は現在のインターネットにおいて欠くことのできない名前解決システムとなっており、Web サービスやメールシステムなどの数多くのサービス・システムが DNS に依存している。そのため、DNS の障害は他のサービスやシステムにまで影響を及ぼすことが少なくなく、権威サーバの設定の妥当性や耐障害性を評価することは DNS に依存したサービスおよびシステムを安定運用する上で重要である。とりわけ IPv6 の導入に伴い、従来の IPv4 のみの単純な委譲関係だけではなくトランスポートを考慮した複雑な委譲構造を考慮する必要がある。本論文では、トランスポートを考慮した名前解決における委譲に基づいた DNS の木構造データベースの探索過程をラベル付き有向グラフ構造 (DNS 探索グラフ) として表現する手法を導入し、世界的な IPv6 運用試験イベント期間中およびその前後に計測した DNS 探索グラフデータセットに対して、IPv4 および IPv6 の異なるトランスポートによる A レコードおよび AAAA レコードの名前解決における探索経路の傾向分析を行う。これにより、IPv6 アドレスを示す AAAA レコードの解決においても 81% ものドメイン名で IPv4 トランスポートが不可欠であり、また、世界的な IPv6 運用試験において、AAAA レコードを持つドメイン名の数は増加したが IPv6 トランスポートのみにより AAAA レコードを解決できるドメイン名の数は大きく変化しなかったことから、DNS の権威サーバの IPv6 トランスポートへの対応が課題であることを示す。

The domain name system (DNS) has become a key infrastructure on the Internet, which is a tree-structured directory service to look up resources, such as corresponding IP addresses, from domain names. Many services and systems, such as Web services and E-mail systems, deeply rely on DNS. A DNS fault could make a crucial impact on these services and systems. Therefore, evaluating the impact of misconfiguration and the fault tolerance is essential to keep services stable. Moreover, the DNS delegation relationships recently become more complex because the DNS runs on the IPv4 & IPv6 coexisting Internet. In this paper, we employ the DNS lookup graph that represents the domain name lookup procedure as a labeled directed graph to show trends of the DNS lookup path in resolving A and AAAA records with IPv4 and IPv6 transport protocols using the datasets measured before, during, and after World IPv6 Day, and after World IPv6 Launch. The results reveal that these IPv6 events have promoted to add AAAA records to each domain name but most of them cannot be resolved only with IPv6 transport; i.e., IPv4 transport is required to resolve most (about 81%) of the AAAA records.

1 はじめに

DNS (Domain Name System) は現在のインターネットにおいて欠くことのできない名前解決システムとなっており、Web サービスやメールシステムなどの数多くのサービス・システムが DNS による名前解決を前提としている。そのため、DNS の障害や誤設定による品質低下はこれらのサービスやシステムにまで影響を及ぼすことが少なくなく、DNS に依存したサービスおよびシステムを安定運用する上で DNS サーバの設定におけるその性能や耐障害性を評価する

A Graph-based Analysis on DNS Delegation Relationships in IPv4 & IPv6 Coexisting Internet

Hirochika Asai, 東京大学大学院情報理工学系研究科, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

Kensuke Fukuda, 国立情報学研究所, National Institute of Informatics.

Hiroshi Esaki, 東京大学大学院情報理工学系研究科, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo.

コンピュータソフトウェア, Vol.0, No.0 (0), pp.0-0.

[研究論文] 2012 年 6 月 22 日受付.

ことは重要である。そのため、DNS の名前解決における性能および品質や権威サーバにおける委譲関係の誤設定による影響を評価する研究は従来から数多く行われてきた [10][14][4][15][7][17][16]。しかし、近年の IPv6 の普及により、IPv6 アドレスを示す AAAA レコードの解決や IPv6 トランスポートでの名前解決が加わり、DNS の名前解決過程はより複雑になった。例えば、A レコードしか持たないドメイン名に対しても AAAA レコードの名前解決が行われることにより応答速度が低下したり、IPv6 アドレスを持つホストの AAAA レコード解決においても権威サーバが IPv6 対応していない場合は IPv4 トランスポートが必要となるという問題が発生している。そこで、これらの問題に対し、名前解決の探索経路におけるトランスポートまで含めた DNS の委譲構造の分析手法が必要になってきている。

本論文では、名前解決クエリのトランスポートとして IPv4 および IPv6 の両方を用いたアクティブ計測を行うことで、名前解決における委譲に基づいた DNS の木構造データベースの探索過程をトランスポート情報をラベルとして付与したラベル付き有向グラフ構造 (DNS 探索グラフ) として表現する手法を導入し、世界的な IPv6 運用試験イベントである World IPv6 Day^{†1} (2011 年 6 月 8 日) の期間中およびその後、World IPv6 Launch^{†2} (2012 年 6 月 6 日) 以降に計測した DNS 探索グラフデータセットに対して、IPv4 および IPv6 の異なるトランスポートによる A レコードおよび AAAA レコードの名前解決における探索経路の傾向分析を行う。これにより、AAAA レコードの名前解決に対しても IPv4 トランスポートが不可欠であり、また、A レコードの解決に IPv6 トランスポートを用いることで名前解決の品質が低下してしまう恐れがあることを示す。また、世界的な IPv6 運用試験においても AAAA レコードを持つドメイン名数は増加したが IPv6 トランスポートのみにより AAAA レコードを解決できるドメイン名数は大きく変化しなかったことを示し、DNS の権威サーバに

おける IPv6 トランスポートへの対応が課題であることを議論する。

本論文の貢献は次の二つである。

1. 名前解決における委譲に基づいた DNS の木構造データベースの探索過程について、異なるトランスポートによる委譲関係を効率的に扱うことができる表現手法を導入したこと。
2. DNS 探索グラフを用いた分析により、IPv4 および IPv6 が混在する現在のインターネットにおいて DNS の IPv6 対応に関する課題を明らかにしたこと。

2 関連研究

DNS において名前解決時間の短縮や権威サーバの負荷軽減を目的として導入されているキャッシュサーバの性能解析および性能向上手法の研究は数多くされてきた [14][7]。また、DNS 探索ツリーの委譲関係を解析することで RFC1912 [3] で紹介されている DNS 権威サーバの誤設定が実際のインターネット上でどれくらい発生しているかを調査し、その誤設定による名前解決の耐障害性への影響を解析する研究も行われてきた [17]。しかし、近年の IPv6 の普及により、AAAA レコードの解決や IPv6 トランスポートによる名前解決過程が加わり、名前解決における探索経路においてトランスポートまで含めた新たな分析が必要になってきている。

Plonka ら [18] は、DNS のキャッシュサーバにおいて名前解決クエリ・レスポンスをパッシブ計測することで、実インターネットにおける DNS トラフィックの特徴を分析した。より具体的には、1) IP アドレス (A レコード・AAAA レコード) や電子メールの配達先 (MX レコード) の解決といった RFC で意図された DNS トラフィック、2) ブラックリストの確認など他のサービスに利用されている DNS トラフィック、3) 存在しないトップレベルドメイン (TLD: Top Level Domain) の問い合わせなど名前解決不可能な DNS トラフィックの 3 種類の DNS トラフィックについて、それぞれ分析・分類を行った。Plonka らは AAAA レコードの解決も分析対象として扱っているが、この分析では名前解決クエリ・レスポンスのパッ

^{†1} <http://internetsociety.org/ipv6/archive-2011-world-ipv6-day>

^{†2} <http://www.worldipv6launch.org/>

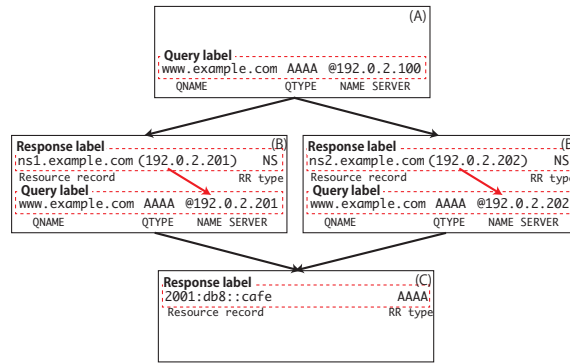
シブ計測に基づいているため、DNS 委譲構造に対する名前解決過程におけるトランスポートの差異については考慮されていない。また、IPv6 トランスポートを用いた名前解決の性能評価に関する研究 [6][8] も行われているが、これらの研究においても DNS の委譲関係および探索経路の分析は行われていない。

Pappas ら [16] は DNS 設定の特徴を解析し影響を及ぼす誤設定を検出するため、複数の計測点から DNS 探索を行う手法を提案した。彼らは DNS ツリーの委譲関係をグラフ構造として表すことで DNS 権威サーバの誤設定を検出するツールを提供しているが、このグラフは委譲関係のみを表しておりトランスポートに使われるネットワーク層のプロトコル（すなわち IPv4 および IPv6）については表現できていない。DNS の委譲関係を有向グラフとして表し、ドメイン間の依存関係を確率遷移として表すことで、名前解決の品質を解析した Deccio らの研究 [11] は、DNS における権威サーバの依存関係を有向グラフとして表す点においては、本研究のアプローチと類似している。しかし、彼らの研究では名前解決に用いるトランスポートの違いについては考慮されていない。

我々は、予備実験として、DNS の名前解決におけるトランスポートを考慮した DNS 探索グラフの可視化により DNS 権威サーバにおける誤設定の検出やボトルネックの評価への応用可能性を示したが、DNS 探索グラフの特性に対する詳細な分析については行っていない [21]。

3 DNS 探索グラフ

DNS における名前解決は委譲に基づいた木構造のデータベースに対して再帰的に問い合わせることにより行われる。Pappas らの手法 [16] では DNS の委譲関係から有向グラフを構成しているが、本論文では、DNS の委譲関係だけでなく名前解決におけるトランスポートも考慮し、DNS の委譲に基づく木構造データベースの探索過程をラベル付き有向グラフとして表す手法を提案する。なお、このラベル付き有向グラフを DNS 探索グラフと呼ぶ。本節では、アクティブ計測による DNS 探索グラフの構築法を示すとともに、そのグラフ特性から名前解決におけるトラン



(A) 探索の根となるルート DNS サーバへのクエリ

(B) レスポンス（Answer または Authority セクション中の 1 レコード）およびこのレスポンスに応じた次の問い合わせクエリ

(C) Authoritative answer かつ最終的な回答であるレスポンス

図 1 DNS 探索グラフのラベル付け例

サポートを考慮した DNS 委譲構造の耐障害性や権威サーバの誤設定が評価できることを示す。

DNS の名前解決過程において、通常、ある問い合わせに対する回答（Answer または Authority セクション）は複数あり一対多の関係である。一方、回答内のある 1 レコードに対する次の問い合わせは一意に定まる。そこで、DNS 探索グラフでは、グラフの頂点はレスポンス（Answer または Authority セクション中の 1 レコード）とこのレスポンスに対応する次の問い合わせクエリの組み合わせを表し、辺はその問い合わせクエリに対するサーバからの回答に含まれる各レスポンス（レコード）への関係を表す。すなわち、DNS 探索グラフにおける頂点には、図 1 に示すように、レスポンスに関するラベル（リソースレコード、リソースタイプ）およびクエリに関するラベル（問い合わせ名、問い合わせタイプ、問い合わせ先ネームサーバ）の二種類のラベルが付与される。より具体的には、レスポンスラベルとクエリラベルは頂点の種別ごとに次の 3 つの規則により付与される。

1. 探索の根となるルート DNS サーバへのクエリ：探索の根であるためこの頂点にレスポンスラベルは付与されず、ルート DNS サーバへの問い合

わせに関するクエリラベルのみが付与される。

2. レスポンス (Answer または Authority セクション中の 1 レコード) およびこのレスポンスに応じた次の問い合わせクエリ: レスポンスラベルとそれに対応したクエリラベルが付与される。なお、レスポンスに対応した次の問い合わせクエリとは、DNS の委譲 (Authority セクション) に従った再帰問い合わせ、Authority セクションの NS レコードや Answer セクションの CNAME レコードの名前解決を行うクエリのことである。
3. Authoritative answer かつ最終的な回答であるレスポンス: 最終的な回答であるレスポンスであるため、この頂点にはこれに応じた再帰問い合わせのクエリラベルは付与されず、レスポンスラベルのみが付与される。

なお、この DNS 探索グラフはアクティブ計測により構築する。通常の DNS クライアント (リゾルバ) による名前解決ではその委譲ツリーに従い深さ優先で探索するが、DNS 探索グラフの構築においては幅優先 (全ての委譲先ネームサーバへの問い合わせ) で取り得る全ての探索過程を計測する。以下に、本論文における DNS 探索グラフの構築のためのアクティブ計測について、使用するルート DNS サーバ、Authority セクションとグルーレコードの取り扱いおよび CNAME の探索、キャッシュの取り扱い、DNS パケットについてまとめる。

- **ルート DNS サーバ**: ルート DNS サーバは名前解決において探索の根となる。`[a-m].root-servers.net` の 13 個全てのルート DNS サーバを使用する。
- **Authority セクション (NS レコード) とグルーレコード**: Authority セクションの NS レコードに対してグルーレコード (レスポンス内の Additional レコード) が指定されている場合は、このレスポンスに応じたクエリでグルーレコードで指定されたサーバ (アドレス) に再帰問い合わせをする。グルーレコードが指定されていない場合は、Authority セクションの NS レコードに対して A レコードおよび AAAA レコードをルート DNS サーバから再帰的に解決する。

- **CNAME**: CNAME は Authoritative answer のレスポンス内の Additional レコードから最終的な回答を得られない場合は、ルート DNS サーバから CNAME を解決する。
- **キャッシュ**: アクティブ計測において権威サーバからのレスポンスのキャッシュは行わない。但し、単一の DNS 探索グラフの構築過程において、同一のネームサーバへの同一クエリは二度目以降は問い合わせを行わずに DNS 探索グラフにおいて辺を接続することにより探索試行の無限ループを防ぐ。
- **DNS パケット**: 本論文では、DNS の問い合わせには最大 512 バイトのメッセージ長の UDP で計測を行う。

このような条件の下でアクティブ計測を行い DNS 探索グラフを構築する。図 2 は `www.google.com` の A レコードを解決するときの DNS 探索グラフを可視化した例である。この図において、(A) の頂点群は探索の根となるルート DNS サーバへのクエリ、すなわち `[a-m].root-servers.net` への `www.google.com` の問い合わせを表し、(C) の頂点群は最終的なレスポンスを表している。また、各頂点について、トランスポートに IPv4 を用いたクエリを四角、IPv6 を用いたクエリを円で表している。この DNS 探索グラフを用いたトランスポートを考慮した分析は、クエリラベルのトランスポートに従い頂点または辺を除去することで得た部分有向グラフを分析することで実現できる。例えば、トランスポートに IPv6 のみを用いて名前解決が可能かどうかを判断する場合には、この図の四角の頂点を除去した (円で表される頂点のみを辿る) 部分有向グラフ上で、探索の根となるルート DNS サーバへのクエリから最終的なレスポンスを得ることができるかを判定すれば良い。なお、`{a,c,e,i,j}.root-servers.net` の 5 つのルート DNS サーバは DNS メッセージの 512 バイト制限のため、`.com` の権威サーバの一つである `m.gtld-servers.net` のグルーレコードを返さない。そのため、図 2 では (X) および (Y) で示したように `m.gtld-servers.net` の名前解決を行う部分グラフが存在している。

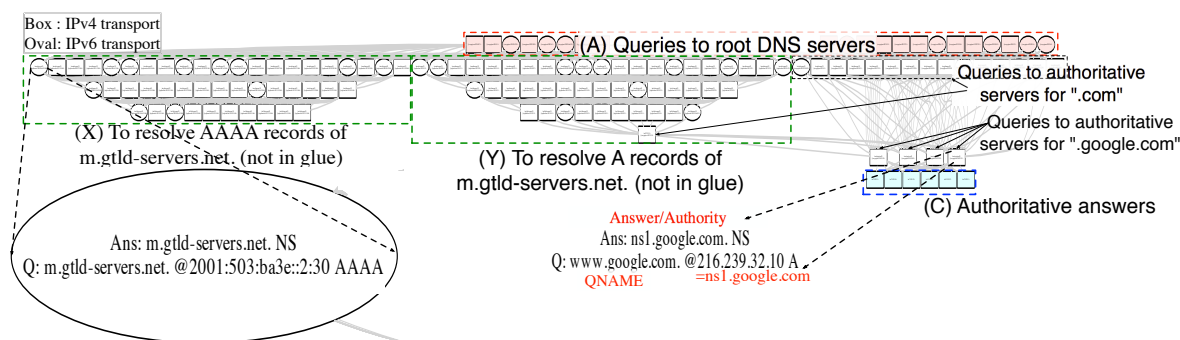


図 2 DNS 探索グラフ : www.google.com (A レコード)

DNS 探索グラフは再帰問い合わせで取り得る全ての探索過程を計測しているため、予備実験 [21] でも示したように、DNS 探索グラフの可視化およびそのグラフ特性は現在の設定の妥当性やボトルネック、単一故障点などを評価するのに有用である。また、DNS 探索グラフはラベル付き有向グラフとして表されるため、既存のグラフ解析手法を応用し DNS 探索グラフの特性を定量的に分析することが可能である。例えば、DNS 探索グラフにおいて循環路を検出することで権威サーバの誤設定の一つである委譲関係のループを検出することができる。実際に、100 頂点の規模の DNS 探索グラフにおいて循環路を発見することにより権威サーバの誤設定を検出できた。また、頂点間の辺に遷移確率を設定することで各頂点への到達確率を計算することができ、この確率により障害発生時の影響度を評価することができる。さらに、この遷移確率を応用することで、図 2 における (X) のように、グルーレコードを含まないレスポンスにおいてネームサーバの名前解決に失敗し、別の探索経路を再試行（フォールバック）するような名前解決速度の低下を引き起こす探索経路への到達確率を評価できる。実際に図 2 の例では、ある頂点から別の頂点への遷移確率について Authority セクションの複数の候補から無作為に選択すると仮定すると、頂点間の遷移確率から (X) に到達する確率が 1.48% であることがわかる。

4 DNS 探索グラフの解析

前節で DNS 探索グラフの可視化およびその特性の分析によりトランスポートを考慮した権威サーバの

誤設定の検出や DNS 委譲構造に対する耐障害性の評価ができることを示した。本節では、大規模なドメイン名データセットに対して、IPv4 および IPv6 の異なるトランスポートによる A レコードおよび AAAA レコードの名前解決における探索経路の傾向分析を行う。ここで、トランスポートを考慮した DNS 委譲構造の分析を行うために前節で説明した DNS 探索グラフを応用する。

4.1 データセット

まず本論文で解析に用いるドメイン名データセットについて説明する。DNS においてドメイン名はツリー構造のデータベースにより分散管理されており、大量のドメイン名リストを取得することは非常に困難である。Brownlee ら [4] による実験のように Root DNS サーバでのパッシブ計測データを用いることで問い合わせのあったドメイン名のリストを得ることができるが、ルート DNS サーバへの問い合わせデータは一般に公開されていない。また、Internet Systems Consortium (ISC) により、ドメイン名データ [9] も公開されているが、1997 年以降は調査方法が正引き（ゾーン転送）ではなく逆引きによるドメイン名の調査に変更されたため、本論文で解析の対象とする正引きのデータは提供されていない。

そこで、本論文では Web ページのハイパーリンクを巡回することでドメイン名リストを収集した。Web ページのハイパーリンクの巡回は、<http://directory.google.com/> および <http://www.ietf.org/> を起点として、各 Web サイトの

表 1 各 DNS 探索グラフデータセットに含まれる有効ド

メイン数	
データセット名	有効ドメイン数
Before IPv6 Day	41524
During IPv6 Day	41518
After IPv6 Day	41524
IPv6 Launch	39265

robots.txt ファイルに指定されている巡回ポリシーに従い実施した。Web ページのハイパーリンクの巡回により、2011 年 1 月 17 日から 2011 年 3 月 26 日までに約 490 万のユニーク URL を取得し、これらの URL から 320058 のドメイン名を得た。このうち、巡回時に A レコードまたは AAAA レコードのいずれかが解決できた有効なドメイン数は 185785 (58%) であった。残りの解決できなかったドメイン名は主としてスパム等に用いられる一時的なドメイン名であることを確認した。

本論文では、これらの有効なドメインのうち無作為に選択した 54638 ドメインに対し、世界的な IPv6 運用試験イベントにあわせ、次の 4 回の A レコードおよび AAAA レコードの名前解決によるアクティブ計測により、4 つの DNS 探索グラフデータセットを得た。

- **Before IPv6 Day** : 2011 年 6 月 7 日 (World IPv6 Day 前)
- **During IPv6 Day** : 2011 年 6 月 8 日 (World IPv6 Day 期間中)
- **After IPv6 Day** : 2011 年 6 月 15 日 (World IPv6 Day 後)
- **IPv6 Launch** : 2012 年 6 月 6 日 (World IPv6 Launch 以降)

各データセットに含まれる各計測時に A レコードまたは AAAA レコードのいずれかが解決できた有効なドメイン数を表 1 にまとめる。本論文では、これらのデータセットにおける DNS 探索グラフを対象に分析を行った。なお、World IPv6 Day は 24 時間限定で IPv6 運用試験を行う趣旨のイベントであり、World IPv6 Launch はこれ以降恒久的に IPv6 を有効化する趣旨のイベントであった。ここで、有効な 185785 ドメインから無作為に 54638 ドメインを選択した理由

は、World IPv6 Day は 24 時間のみ実施されたイベントであり全ドメインへの計測は実施できなかったためである。そのため、World IPv6 Day 前日 (Before IPv6 Day) に無作為順序により 24 時間以内に計測が完了した 54638 ドメインのみを用いた。この 54638 ドメインは無作為に抽出され、また全有効なドメインの 29% にあたるため、解析結果に影響はないと考えられる。なお、選択した 54638 ドメインのうち 67 ドメインが Alexa Top 500 Global Sites [1] に含まれており、選択したドメインは特殊なものばかりではなくアクセス数の多い Web サイトのドメイン名も多く含んでいた。また、World IPv6 Day 以外は時間の制約はなかったが、異なるデータセット間での傾向を比較するために各データセットの計測において同一の 54638 ドメインを用いた。

4.2 IPv6 トランスポートによる名前解決

近年の IPv6 の普及により、AAAA レコードの解決や IPv6 トランスポートによる名前解決過程が加わり、名前解決における探索経路は複雑になってきているが、トランスポートを含めた DNS の委譲構造についてはこれまで調査分析されてこなかった。RFC4472 [13] では、全てのゾーンに対して少なくとも 1 つの権威サーバは IPv4 での接続性を提供すべきであると規定しているため、権威サーバが RFC4472 に従い運用されていれば IPv4 トランスポートのみによる名前解決は保証される。しかし、RFC4472 では権威サーバにおける IPv6 の設定については規定されていないため、IPv6 トランスポートによる名前解決は保証されておらず各ゾーンの運用ポリシーおよび設定に依存する。本小節では、DNS 探索グラフを用いて IPv6 トランスポートによる名前解決の能否と品質への影響について傾向を分析する。

まず、IPv6 Launch データセットに含まれる各ドメイン名について、IPv4 トランスポートおよび IPv6 トランスポート、またはそれらのどちらか一方を用いた場合の A レコードおよび AAAA レコードに対する名前解決の能否をまとめ、その傾向について議論する。特定のトランスポートを用いた名前解決の能否を判定する問題は、DNS 探索グラフからクエリラベル

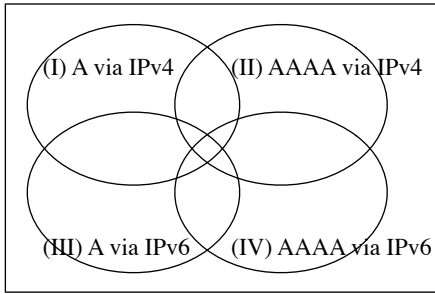


図 3 名前解決におけるレコード種別とトランスポート

のトランスポートに基づき特定のトランスポート以外の頂点を除外した部分有向グラフの到達性問題であり、既存のグラフ解析手法を用いることができる。ここで、有向グラフの到達性問題は、有向グラフを隣接行列 A と表したとき次のように表される。 x 行 x 列に対応する頂点 v_x から y 行 y 列に対応する頂点 v_y までの到達性を判定するとき、

$$S = \begin{pmatrix} s_{ij} \end{pmatrix} \begin{cases} s_{ij} = 1 & \text{where } i = j = x \\ s_{ij} = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T = \begin{pmatrix} t_{ij} \end{pmatrix} \begin{cases} t_{ij} = 1 & \text{where } i = j = y \\ t_{ij} = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

とすると、

$$SA^{(i-1)}T = O \quad (\forall i \in \mathbb{N} \mid 1 \leq i \leq n)$$

であるとき v_x から v_y への到達性がないと判定できる。なお、DNS 探索グラフからクエリラベルに基づきトランスポートを考慮した部分有向グラフを構築する必要があるが、クエリラベルに基づき DNS 探索グラフからトランスポートを考慮した部分有向グラフを得る計算は隣接行列への変換と同時に行えるため、計算上の損失はほとんどない。

ドメイン名の正引きにおいて、IPv4 アドレスを表すリソースには A レコード、IPv6 アドレスを表すリソースには AAAA レコードが使用される。また、これらのレコードを解決するためのトランスポートとして、IPv4 または IPv6 が使用される。図 3 に名前解決におけるレコード種別 (A/AAAA) とトランスポート (IPv4/IPv6) の組み合わせをまとめる。集合 I は A レコードを IPv4 トランスポートから解決できるドメイン名、集合 II は AAAA レコードを IPv4 ト

表 2 IPv6 Launch データセットにおける各集合に属するドメイン名の数

	ドメイン名の数
総数	39265
A レコードあり	39245
AAAA レコードあり	4725
集合 I	39150
集合 II	4662
集合 III	3513
集合 IV	839
集合 II \ 集合 IV	3837
集合 IV \ 集合 II	14
集合 III \ 集合 I	0

ランスポートから解決できるドメイン名、集合 III は A レコードを IPv6 トランスポートから解決できるドメイン名、集合 IV は AAAA レコードを IPv6 トランスポートから解決できるドメイン名を表している。これに従うと、例えば、A レコードを IPv4 トランスポートでも IPv6 トランスポートでも解決できるドメイン名は集合 I および III の積集合に属する。なお、トランスポートに IPv4 と IPv6 の両方を利用しないと解決できないドメイン名も理論上は存在しうるため、集合 I-IV 以外に属するドメイン名も存在しうる。例えば、foo.bar.example.net の名前解決に対して、example.net ゾーンの権威サーバが全て IPv6 非対応でかつ bar.example.net ゾーンの権威サーバが全て IPv4 非対応である場合などが集合 I-IV 以外に属するドメイン名に該当する。ただし、RFC4472 [13] では、全てのゾーンに対して少なくとも 1 つの権威サーバは IPv4 での接続性を提供すべきであると規定しているため、IPv4 非対応の権威サーバは多くは存在しないと考えられる。

表 2 に IPv6 Launch データセットにおける各集合に属するドメイン名の数をもとめる。[集合 III \ 集合 I] は A レコードが付いているドメイン名のうち IPv4 トランスポートで解決できないものを表しているが、このようなドメイン名は IPv6 Launch データセットには含まれなかった。一方、[集合 IV \ 集合 II] は AAAA レコードが付いているドメイン名のうち IPv4 トランスポートで解決できないものを表しており、こちらは AAAA レコードが付いているドメイン名全体

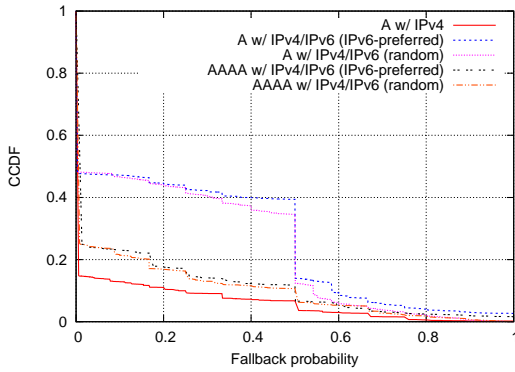


図 4 各名前解決戦略におけるフォールバック発生確率

の 0.30% (14/4725) であり非常に少ない割合である。これは RFC4472 で規定されているように各ゾーンに対する権威サーバが IPv4 で DNS サービスを提供しているためであるが、この結果から AAAA レコードの名前解決においては RFC4472 に従わず IPv6 トランスポートを用いなければ解決できない AAAA レコードが少数ではあるが存在することが示された。[集合 II \ 集合 IV] は AAAA レコードが付いているドメイン名のうち IPv6 トランスポートで解決できないものを表しており、AAAA レコードが付いているドメイン名全体の約 81% (3837/4725) にも及ぶ。つまり、IPv6 に対応したサービスを提供しておりドメイン名に AAAA レコードを設定していても、多くの場合 DNS における名前解決には IPv4 トランスポートが不可欠であるということを示している。すなわち、DNS の名前解決における探索経路においては、IPv6 トランスポートは IPv4 アドレスを表す A レコードのみならず IPv6 アドレスを表す AAAA レコードの解決に対しても不十分であり、IPv4 トランスポートが必須であると言える。

4.3 フォールバック発生確率の評価

予備実験 [21] および第 3 節でも指摘したように、DNS の委譲はドメイン名により行われるため、グローバルレコードが存在せずにネームサーバのアドレスを解決する必要がある場合は、ネームサーバの AAAA レコードの解決が行われる可能性がある。しかし、対象のネームサーバが IPv6 対応していない場合はこの

問い合わせが失敗し A レコードを再探索するため、このフォールバックによるオーバーヘッドが発生し、名前解決において応答速度が遅くなるなど性能低下が生じてしまう。なお、ネームサーバの名前解決（特に AAAA レコードの解決）の失敗以外によるフォールバックの原因として、パケットロスや一時的なネットワークまたは権威サーバの障害、誤設定が挙げられるが、これらはネームサーバの名前解決によるフォールバックと比較して稀であると考えられるため、本論文では対象としない。フォールバックが発生する確率は、DNS 探索グラフにおいて、ある頂点から別の頂点に遷移する確率を名前解決戦略に応じて設定することで計算できる。本論文では次の 3 つの名前解決戦略についてフォールバック発生確率を評価する。

1. “A w/ IPv4”: IPv4 トランスポートのみを用いて A レコードを解決する戦略。DNS 探索グラフからクエリラベルに基づき IPv6 トランスポートの頂点を取り除いた部分有向グラフ上の頂点間を等確率で遷移する。
2. “A/AAAA w/ IPv4/IPv6 (IPv6-preferred)”: IPv6 トランスポートを優先的に利用して IPv6 トランスポートが利用できない条件でのみ IPv4 を利用して A/AAAA レコードを解決する戦略。DNS 探索グラフからクエリラベルに基づき、IPv6 トランスポートの隣接頂点への辺が存在する全ての頂点からの IPv4 トランスポートの隣接頂点への辺を取り除いた部分有向グラフ上の頂点間を等確率で遷移する。
3. “A/AAAA w/ IPv4/IPv6 (random)”: IPv4 および IPv6 トランスポートの差異を考慮せずに無作為に選択して A/AAAA レコードを解決する戦略。DNS 探索グラフ上の頂点間を等確率で遷移する戦略であり、DNS 探索グラフ上のランダムウォークに該当する。

図 4 はそれぞれの名前解決戦略を取った場合のフォールバック発生確率の CCDF を表している。この図は大きく三つの傾向を表している。まず一つ目の傾向は、IPv4 トランスポートのみを用いて A レコードを解決する戦略 (“A w/ IPv4”) は他の戦略と比較してフォールバック発生確率が最も低いことであ

る。これは、多くのネームサーバが IPv4 に対応しており、A レコードが設定されているため、IPv4 トランスポートを利用するためのネームサーバの A レコードの解決に失敗する確率が低いためである。二つ目の傾向は、A レコードの解決に IPv6 トランスポートを利用する戦略 (“A w/ IPv4/IPv6 (IPv6-preferred/random)”) のフォールバック発生確率が、他の戦略と比較して非常に高いことである。A レコードの解決に IPv6 トランスポートを用いた場合、43% のドメイン名でフォールバックが発生している。これは、AAAA レコードの設定された IPv6 トランスポート対応のネームサーバが少ないためである。三つ目の傾向は、AAAA レコードの解決に IPv6 トランスポートを利用する戦略 (“AAAA w/ IPv4/IPv6 (IPv6-preferred/random)”) のフォールバック発生確率が、IPv4 トランスポートのみを用いて A レコードを解決する戦略よりも高く、A レコードの解決に IPv6 トランスポートを利用する戦略よりも低いことである。これらの傾向をまとめると、IPv6 トランスポートを利用する戦略、特に A レコードの解決において IPv6 トランスポートを利用する戦略は名前解決の性能低下につながる事が示された。なお、どの戦略においてもフォールバック発生確率が 0.5 を超えるものが少ないのは、フォールバックが発生するネームサーバの名前解決に対して A レコードと AAAA レコードの探索経路があるが、権威サーバにおける誤設定やバケロス、ネットワークまたは権威サーバに障害が発生していなければ、これらのうち少なくとも一方は解決できるためである。

4.4 IPv6 運用試験イベントの分析

本小節では第 4.1 項で定義した 4 つのデータセットに対して、第 4.2 項で行った名前解決におけるレコード種別とトランスポートの分析を行い、World IPv6 Day および World IPv6 Launch による DNS の委譲構造の変化について議論する。まず、4 つのデータセットについて、各データセットで計測した 54638 ドメインの内、全てのデータセットにおいて A レコードまたは AAAA レコードが解決できた 37678 個のドメイン名を分析対象とした。

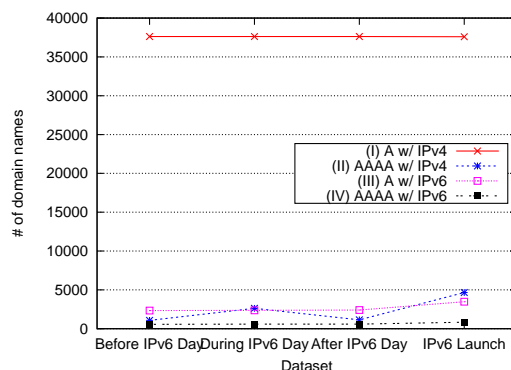


図 5 World IPv6 Day 期間中およびその前後と World IPv6 Launch 以降のデータセットにおけるレコード種別とトランスポートの分類

図 5 に World IPv6 Day 期間中およびその前後と World IPv6 Launch 以降のデータセットにおけるレコード種別とトランスポートの分類を示す。この図より、World IPv6 Day 当日および World IPv6 Launch 以降は IPv4 トランスポートにより解決できる AAAA レコードの数が増加しているが、IPv6 トランスポートにより解決できる A および AAAA レコード数はほぼ変化しなかったことがわかる。すなわち、World IPv6 Day および World IPv6 Launch ではサービスを提供するドメイン名に AAAA レコードが付与されたものの、各権威サーバの IPv6 トランスポートへの対応が大きく行われなかったことがわかる。また、World IPv6 Day 後はイベント前のように戻っていた。しかし、IPv6 トランスポートにより解決できる A および AAAA レコード数 (図 3 における集合 (III) および集合 (IV)) は、傾きは大きくないものの単調増加傾向にあり、権威サーバの IPv6 トランスポートへの対応はイベントによる巨視的な対応はないものの少しずつ進んでいることが見て取れる。

図 6 は AAAA レコードが付いているドメイン名のうち IPv6 トランスポートで解決できないドメインの数およびその割合と AAAA レコードが付いているドメイン名のうち IPv6 トランスポートで解決できるドメインの数を示しており、この図からも AAAA レコードの付いているドメイン数は World IPv6 Day および World IPv6 Launch により大幅に増加したも

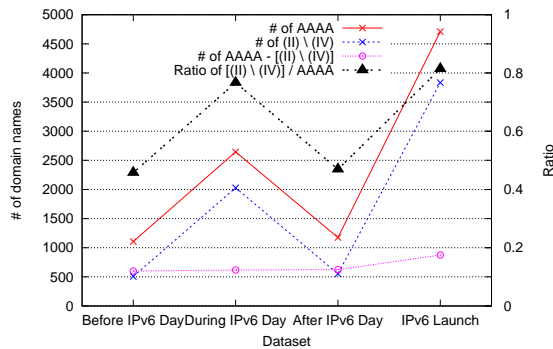


図6 World IPv6 Day 期間中およびその前後と World IPv6 Launch 以降の AAAA レコードに関する分析結果

の、AAAA レコードが付いているドメイン名のうち IPv6 トランスポートで解決できるドメインの数の増加は少なく、権威サーバの IPv6 トランスポートへの対応が大きく行われなかったことがわかる。

5 考察

DNS 探索グラフの優位性

第4節では DNS 探索グラフを用いて IPv6 運用試験イベント期間中および前後の計測データセットに対して DNS の委譲構造の分析を行った。第4節で分析したように、IPv6 の普及により、AAAA レコードの解決や IPv6 トランスポートによる名前解決過程が加わることで、DNS の名前解決における探索経路は複雑になってきている。DNS 探索グラフは従来手法 [16] とは異なり、名前解決におけるトランスポートを含めた探索過程をラベル付き有向グラフとして表現することができ、IPv4 および IPv6 が混在する環境における DNS の委譲構造の分析を可能とした。なお、本論文で行った到達性判断やフォールバック発生確率の計算については DNS 探索グラフを用いずに、通常の DNS クライアントによる名前解決のように DNS の木構造データベースを辿り一定回数または一定時間以内に名前解決ができるかを判定したり、同様の手法でフォールバック率を計測する方法が考えられるが、このような手法は DNS の木構造データベースに対して全探索を行わないため結果が確実で

はない。一方、DNS 探索グラフでは名前解決に対し DNS の木構造データベースを全探索した結果をグラフ構造として保持するため、到達性判断やフォールバック発生確率の計算を確実に行うことができる。また、DNS 探索グラフはラベル付き有向グラフとして表現されるため、グラフの特徴量解析やグラフマイニングなど、他のグラフ分析手法を広く応用できる点でも優位であると考えられる。

DNS 探索グラフの分析結果に対する議論

本論文において第4節で行った DNS 探索グラフの分析から得られた知見を以下にまとめ、DNS の IPv6 への移行について議論する。IPv6 運用試験イベントなどにより AAAA レコードの設定は促進されたが、DNS の権威サーバにおける IPv6 トランスポートへの対応（ネームサーバへの AAAA レコードの設定）は進んでおらず、名前解決において IPv4 トランスポートが必要不可欠である。また、このような状況で IPv6 トランスポートを使用しようとネームサーバの AAAA レコードを解決すると名前解決の再起問い合わせにおいてフォールバックが発生し、名前解決速度の低下を引き起こす可能性がある。特に A レコードの解決において IPv6 トランスポートを使用する場合、43% ものドメイン名でフォールバックが発生することが示された。さらに、RFC4472 では、全てのゾーンに対して少なくとも1つの権威サーバは IPv4 での接続性を提供すべきであると規定しているため、現状では名前解決には IPv4 トランスポートを用いることが名前解決の性能維持にはより良いと考えられる。しかし、このような状況では DNS は IPv4 トランスポートが必須となり、IPv6 への移行が促進されないため、移行技術や方針が必要となると考える。

フォールバック発生確率の分析について

第4.3項ではフォールバック発生確率による DNS の委譲構造の性能評価を行った。しかし、本論文では、フォールバックの発生する条件を DNS 探索グラフの葉として表現したため、フォールバック後の再探索における遷移確率を DNS 探索グラフ上で定義できない。今後、フォールバックした場合の DNS 探索グラフの構築法として、フォールバックした頂点からさらにグラフを成長させる方法を検討する。なお、

DNS 探索グラフにおける遷移確率は、フォールバック発生確率の計算以外にもループの検出および発生確率の評価や権威サーバまたはネットワーク障害による影響評価に応用することができると考えられる。

アクティブ計測について

本論文におけるアクティブ計測では DNS の問い合わせには最大 512 バイトのメッセージ長の UDP で計測を行い、EDNS0 [19] や TCP での計測には対応しなかったが、第 3 節で例示したようにメッセージ長が 512 バイトを超えてしまうために Additional セクションにグルーレコードを含まないレスポンスを返すネームサーバが存在し、これによりフォールバックが発生する可能性がある。しかし、このようなネームサーバは、Authority セクションおよび Additional セクションに多数のレコードを含むものであるため、ルート DNS サーバや TLD の権威サーバであると考えられ、第 3 節で示したように、このような場合のフォールバック確率は低いため無視できると考えられる。ただし、今後は DNS Security Extensions (DNSSEC) [2] の普及によりルート DNS サーバや TLD の権威サーバ以外の権威サーバからのレスポンスについてもメッセージ長の増大が予想される一方、2009 年時点で既に 50% 以上のクエリが EDNS より長いメッセージ長に対応しておりこの割合は増加傾向にあることが報告されている [5] ため、今後は EDNS0 や TCP による長いメッセージ長でも計測を行い、メッセージ長による影響を考慮したより詳細な分析に対応する。

6 まとめ

本論文では、名前解決クエリのトランスポートとして IPv4 および IPv6 の両方を用いたアクティブ計測により、名前解決のトランスポートを考慮した DNS の木構造データベースの全探索過程をグラフ構造 (DNS 探索グラフ) として表現する手法を提案し、この DNS 探索グラフを用いて、世界的な IPv6 運用試験イベントにて計測した DNS 探索グラフデータセットに対して、IPv4 および IPv6 の異なるトランスポートによる A レコードおよび AAAA レコードの名前解決における探索経路の傾向分析を行った。この結果、AAAA レコードの名前解決に対しても IPv4

トランスポートが不可欠であり、また、A レコードの解決に IPv6 トランスポートを用いた場合は名前解決の品質が低下してしまう恐れがあることを示した。さらに、これらの IPv6 運用試験イベント期間中とその前後の傾向を分析することで、これらのイベントで多くのドメイン名に AAAA レコードが設定されたが、権威サーバの IPv6 トランスポートへの対応は大きくは進んでいないことがわかった。RFC4472 では全てのゾーンに対して少なくとも 1 つの権威サーバは IPv4 での接続性を提供すべきであると規定しているが、今後の IPv6 への移行に際して IPv6 トランスポートを名前解決に用いた場合の性能の低下を排除する技術 (例えば、Happy Eyeballs [20] のような技術) が必要となると考える。本論文では、このような分析を通じて DNS 探索グラフがトランスポートを考慮した DNS 委譲構造の分析に有効であることを示した。

なお、DNS の委譲関係の可視化および解析は、DNSSEC における認証の依存関係の分析にも応用可能であると考えられる。DNSViz [12] では、DNSSEC の認証順序を可視化し、検証するツールを提供しているが、ドメイン名の委譲関係に基づいて検証を行っているため、CNAME や別ゾーンの NS レコードの参照など、実際の名前解決過程に対する DNSSEC の検証は実現できていない。今後、DNS 探索グラフを DNSSEC の検証に応用し、名前解決過程に対して検証のボトルネックや誤設定の影響を評価する手法およびツールを研究・開発する。

謝辞 本研究は科研費 (23680005) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Alexa Internet, Inc.: Alexa Top 500 Global Sites, <http://www.alexa.com/topsites>.
- [2] Arends, R., Austein, R., Larson, M., Massey, D., and Rose, S.: DNS Security Introduction and Requirements, RFC 4033 (Proposed Standard), March 2005.
- [3] Barr, D.: Common DNS Operational and Configuration Errors, RFC 1912 (Informational), February 1996.
- [4] Brownlee, N., Claffy, K., and Nemeth, E.: DNS measurements at a root server, *IEEE GLOBECOM '01*, Vol. 3, 2001, pp. 1672–1676 vol.3.

- [5] CAIDA: Cooperative Association for Internet Data Analysis: DNS Evolution, <http://www.caida.org/research/dns/roottraffic/evolution/>.
- [6] Cho, K., Luckie, M., and Huffaker, B.: Identifying IPv6 network problems in the dual-stack world, *ACM SIGCOMM workshop on Network troubleshooting: research, theory and operations practice meet malfunctioning reality*, NetT '04, ACM, 2004, pp. 283–288.
- [7] Cohen, E. and Kaplan, H.: Proactive caching of DNS records: addressing a performance bottleneck, *Computer Networks*, Vol. 41, No. 6(2003), pp. 707–726.
- [8] Colitti, L., Gunderson, S., Kline, E., and Refice, T.: Evaluating IPv6 adoption in the Internet, *Passive and Active Measurement*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6032, Springer, 2010, pp. 141–150.
- [9] Consortium, I. S.: The ISC Domain Survey, <http://www.isc.org/ds/>.
- [10] Danzig, P. B., Obraczka, K., and Kumar, A.: An analysis of wide-area name server traffic: a study of the Internet Domain Name System, *ACM SIGCOMM '92*, 1992, pp. 281–292.
- [11] Deccio, C., Chen, C.-C., Mohapatra, P., Sedayao, J., and Kant, K.: Quality of name resolution in the Domain Name System, *Network Protocols, 2009. ICNP 2009. 17th IEEE International Conference on*, oct. 2009, pp. 113–122.
- [12] DNSViz: A DNS visualization tool, <http://dnsviz.net/>.
- [13] Durand, A., Ihren, J., and Savola, P.: Operational Considerations and Issues with IPv6 DNS, RFC 4472 (Informational), April 2006.
- [14] Jung, J., Sit, E., Balakrishnan, H., and Morris, R.: DNS performance and the effectiveness of caching, *ACM SIGCOMM IMW '01*, 2001, pp. 153–167.
- [15] Liston, R., Srinivasan, S., and Zegura, E.: Diversity in DNS performance measures, *ACM SIGCOMM IMW '02*, 2002, pp. 19–31.
- [16] Pappas, V., Fältström, P., Massey, D., and Zhang, L.: Distributed DNS troubleshooting, *ACM SIGCOMM NetT '04*, 2004, pp. 265–270.
- [17] Pappas, V., Xu, Z., Lu, S., Massey, D., Terzis, A., and Zhang, L.: Impact of configuration errors on DNS robustness, *ACM SIGCOMM '04*, 2004, pp. 319–330.
- [18] Plonka, D. and Barford, P.: Context-aware clustering of DNS query traffic, *ACM SIGCOMM IMC '08*, 2008, pp. 217–230.
- [19] Vixie, P.: Extension Mechanisms for DNS (EDNS0), RFC 2671 (Proposed Standard), August 1999.
- [20] Wing, D. and Yourtchenko, A.: Happy Eyeballs: Success with Dual-Stack Hosts, RFC 6555 (Proposed Standard), April 2012.
- [21] 浅井大史, 福田健介, 江崎浩: DNS 探索グラフの可視化と解析, *The Tenth Workshop on Internet Technology – WIT2011*, June 2011.