

修士論文 2019 年度 (令和元年)

IPv6 シングルスタックネットワークにおける
ダイナミックなアドレス変換テーブル広告手法

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
豊田安信

IPv6 シングルスタックネットワークにおける
ダイナミックなアドレス変換テーブル広告手法

2019 年現在, IANA が保有する IPv4 アドレスプールは既に枯渇しており, 各地域レジストリからも 2020 年頃には新規割当が行えなくなることが予想されている. 一般に新規に IPv4 アドレスの取得するためにはこのような民間取引市場を利用する方法が考えられるが, 1 アドレスあたりの単価は年々上昇しており, 新規に IPv4 ネットワークを構築するためのコストは日々上昇していくことが考えられる. IDC 事業者・コンテンツ事業者がビジネスを拡大するためには, IPv4 アドレスを極力使用しない IPv6 シングルスタックネットワークの活用が不可欠になっている.

一方で 2019 年現在においても IPv4 によるアクセス・トラフィックは依然としてインターネット全体の大きな割合を占めていることから, IPv6 シングルスタックネットワークでありながら IPv4 によるサービスを継続して提供可能なネットワーク設計が必要になってくると言える.

IPv6 のみ構築された IPv6 シングルスタックネットワークにおいて既存の IPv4 クライアントに対してサービスを提供する方法として, ステートレスアドレス変換を利用した"SIIT-DC"と呼ばれるネットワークデザインがインターネット標準として標準化されている. SIIT-DC では BR(Border Relay) と呼ばれる変換ノードを IPv4 ネットワーク・インターネットとの境界点ごとに設置し, 明示的アドレス変換テーブル (EAMT: Explicit Address Mapping Table) を参照してプロトコル変換を行い, IPv6 ノードでの IPv4 サービス提供を可能にする. しかしながら SIIT-DC では EAMT の動的な交換方法についての定義がなされておらず, 対外接続点が複数存在する場合の冗長性の維持が難しい点や, IPv4 でサービス提供を行なうサーバーの構成変更が行われた場合に運用負荷が非常に高くなる点が課題に挙げられる.

本研究では BGP を利用したアドレス変換テーブルの広告・更新技術と, それを適切に運用するために必要なノード群の設計手法を提案する. これにより, SIIT-DC の課題であった冗長性の維持や構成変更へのに対して, ダイナミックに対応することが可能になる.

この手法を評価するために, 新たに BGP によるアドレス変換テーブル制御機構を実装したソフトウェアルーターを実装し, 多くの対外接続点を持つ学術 ISP である WIDE Project のバックボーンネットワークをモデルケースに, エミュレータを用いて概念検証実験を行った. 考えられる他の手法と比較し, 本手法が冗長性と柔軟性の点で優位であることが証明された.

キーワード:

1. IPv6, 2. データセンターネットワーク, 3. ネットワークオペレーション, 4. IPv6 移行技術

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
豊田安信

Abstract of Master's Thesis - Academic Year 2019

Dynamic advertising method of Explicit Address Mapping in IPv6 single stack network.

Dynamic advertising method of Explicit Address Mapping in IPv6 single stack network.

Keywords :

1. IPv6, 2. Data center network, 3. Network operation, 4. IPv6 transition mechanism

Keio University Graduate School of Media and Governance
Yasunobu Toyota

目次

第1章	序論	1
1.1	IPv6 シングルスタックネットワークに求められる役割	1
1.1.1	IDC ネットワークを取り巻く環境	1
1.1.2	IPv6 シングルスタックネットワーク	3
1.2	本研究のモチベーションと取り組み	4
1.3	本論文の構成	4
第2章	IPv6 シングルスタックネットワークでの IPv4 サービス提供手法	5
2.1	概要	5
2.1.1	IPv4 サービス提供機構に求められる要件	5
2.2	IPv4 サービス提供手法の分類	6
2.2.1	L7 リバースプロキシ	6
2.2.2	IPv4/IPv6 トンネリング	7
2.2.3	IPv4/IPv6 トランスレーション	8
第3章	SIIT-DC のデザインと現状の課題	10
3.1	SIIT-DC	10
3.1.1	概要	10
3.1.2	用語	10
3.1.3	BR の動作	11
3.1.4	ネットワーク設計	11
3.2	SIIT-DC の問題	11
第4章	手法の検討	12
4.1	概要	12
第5章	提案手法	13
5.1	概要	13
第6章	プロトコル設計と実装	14
6.1	実装内容	14
第7章	評価	15
7.1	評価要件	15

第 8 章	結論	16
8.1	本研究のまとめ	16
8.2	本研究の課題	16
	謝辞	17

目 次

1.1	Projection of consumption of Remaining RIR Address Pools. <code>potaroo.net</code> より引用 [1]	2
2.1	L7 リバースプロキシによる IPv4 サービス提供	6
2.2	IPv4/IPv6 トンネリングによる IPv4 サービス提供	7
2.3	IPv4/IPv6 トランスレーションによる IPv4 サービス提供	8

表 目 次

第1章 序論

本章では本研究の背景とモチベーション，および全体の構成について記述する．

1.1 IPv6 シングルスタックネットワークに求められる役割

1.1.1 IDC ネットワークを取り巻く環境

IDC 市場の広がり

近年，ライブ映像配信のようなリアルタイムなサービスに対するニーズが年々高まっている．例えば Cisco 社の調査 [2] によれば，2022 年には全てのアプリケーショントラフィックのうちインターネットビデオが有する割合が 82 % を超え，そのうち 17 % がライブ映像配信が占めると予想されている．リアルタイムな高品質サービスを提供するためには，ユーザーの地理的に近いサービス拠点から配信を行うことが有効であるため，今後 IDC・コンテンツ事業者が各地域拠点を介したコンテンツ配信基盤を活用するしていくことが予想される．

一方で，インフラストラクチャに対する災害や地政学的リスクの軽減は，コンテンツ事業者の継続的な事業の成長のためには避けては通れない課題である [3]．2011 年に発生した東日本大震災以降，国内の IDC 事業者やコンテンツ事業者を中心に，関東大都市圏に集中していたサービス拠点への依存性を解消するために，東京圏以外の各地域にサービス拠点を分散する取り組みが活発だ [4]．大阪・名古屋の他の都市圏の IDC は 2019 年現在満床状態が続いているほか，他の地方拠点都市も含めた IDC 建設も並行して行われている．

特に近年では VXLAN や SRv6 のような新しいネットワーク仮想化技術の標準化も進み，サービス拠点のマルチテナンシーと柔軟性を両立するネットワークデザインの障壁が低くなってきているため，今後より多くの IDC・コンテンツ事業者のサービス拠点の拡大が続くと想定できる．

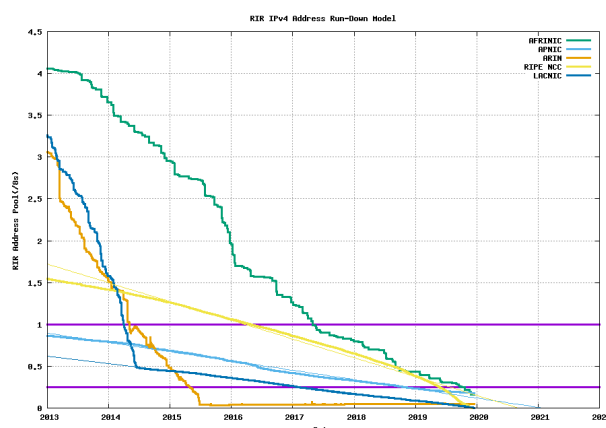


図 1.1: Projection of consumption of Remaining RIR Address Pools. potaroo.net より引用 [1]

IPv4 アドレスの枯渇

2019 年現在, IANA¹が保有する IPv4 アドレスプールは既に枯渇しており [5], 各 RIR²からも 2021 年頃までには新規割当が行えなくなることが予想されている [1].

一方で近年は民間事業者間アドレス取引も盛んに行われている. 一般に新規に IPv4 アドレスの割当を受けるためにはこのような民間取引市場を利用する方法が考えられるが, 1 アドレスあたりの単価は年々上昇傾向にあり [6], 新規に IPv4 ネットワークを構築するためのコストは日々上昇していくことが考えられる.

IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークの問題

IPv6 プロトコルの導入に主に用いられていた手法として IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークが挙げられる [7]. IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークとは, IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークを同一機器群上に並行して運用する手法であり, 企業・一般家庭向けアクセスネットワークを中心に IPv4/IPv6 デュアルスタック環境の整備が進んでいる.

一方でコンテンツ事業者が運用する IDC では以下の主な 3 つの理由からデュアルスタック環境の導入はデメリットが大きい.

- IPv4 アドレスの継続的調達に困難

先に述べたように, IPv4 アドレスをサービスの成長にあわせて継続的に調達していくことは困難である. 民間市場の市況に調達コストが左右されるため長期的な見通しが立てにくい.

¹Internet Assigned Numbers Authority. インターネットに利用される様々な資源を一元的に管理する組織. <https://www.iana.org/>

²Regional Internet Registry.

- オペレーションコストの肥大化
デュアルスタック環境では 2 つの異なる IP プロトコルを同時に運用する必要があるため、シングルスタック環境と比べて運用コストの上昇が見込まれる [?]。
- ネットワーク機器の性能要件の上昇
デュアルスタック環境では、シングルスタック環境よりも多くの経路をネットワーク機器が保持しなければならないため、より高性能な機器を導入する必要がある。

1.1.2 IPv6 シングルスタックネットワーク

IDC 事業者・コンテンツ事業者がビジネスを健全に拡大するためには、IPv6 ネットワークのみで機器間を接続した IPv6 シングルスタックネットワークの利用が不可欠である。

IDC の IPv6 シングルスタックネットワークには以下のような働きが期待される。

IPv4 サービスの提供

Google 社が定常的に行っている調査 [8] によれば、2019 年 12 月現在全世界のインターネットトラフィックの 7 割程度を IPv4 トラフィックが依然として占めている。将来的には IPv6 によるアクセスの割合が徐々に大きくなることが予想されるが、今後しばらくは IPv4 クライアントに対しても IPv6 クライアントと同等にサービス提供を行っていくことが望ましい。

コンテンツ事業者の IPv6 シングルスタックネットワークにおいても、何らかの手段を用いて IPv4 サービスを継続して提供する機構を備える必要がある。

シングルスタック運用による OPEX/CAPEX の削減

第 1.1.1 項で述べたように、IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークではオペレーションコストの肥大化が問題視されていた。IPv6 シングルスタックネットワークでは IPv4 ネットワークを廃止することが出来るため、OPEX³と CAPEX⁴の軽減が期待される。また IPv6 アドレスは IPv4 アドレスと比較して広大なアドレススペースを有するため、アドレススペースに依存しない柔軟なネットワーク設計が可能になる。

IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークと同等以上の性能

IPv6 により提供されるサービスはもちろんのこと、IPv4 によるサービスにおいても IPv4/IPv6 デュアルスタックネットワークと同等の耐障害性・サービス品質・サービス容量が保証されることが望ましい。

とりわけネイティブな IPv4 ネットワーク以外の手段を用いて提供される IPv4 サービスの性能の担保が運用課題になると予想される。

³Operating expense. 運用に掛かる継続的なコスト。

⁴Capital expenditure. 設備配備に掛かる初期投資コスト。

1.2 本研究のモチベーションと取り組み

第 1.1.2 項で述べたような IPv6 シングルスタックネットワークに求められる要件のうち、IPv4 サービスの提供における冗長性や構成変更への追従性の向上を促す手法の確立を目指す。

本研究では IPv6 シングルスタックネットワークにおける IPv4 サービスの提供手法のうち、アーキテクチャがシンプルで広範な利活用が期待される SIIT-DC[9] に着目した。SIIT-DC とは IPv6 ネットワークと IPv4 ネットワークの各境界部に、BR⁵を配備することにより、IPv6 ネットワークのみに属するホストで仮想的に IPv4 サービスを提供するネットワーク設計を定めたインターネット標準である。SIIT-DC において各 BR は静的に定義されたアドレス変換テーブルを利用してネットワークプロトコル変換を行うため、BR を複数配備する場合における一貫性の確保や冗長性、IDC 内の構成変更に対する追従性の面で課題があった。

本研究では動的経路アルゴリズムの一つである BGP[11] を利用したメッセージングによるアドレス変換テーブルの動的な広告手法を提案する。エミュレータを利用した概念実証実験により、本提案手法がこれらの課題に対して効果的に作用することが証明された。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第 2 章では、IPv6 シングルスタックネットワークにおける IPv4 サービス提供手法に関してそれぞれの特徴や利点を紹介し比較する。

第 3 章では、IPv4/IPv6 プロトコル変換を利用した IPv4 サービス提供手法の一つである SIIT-DC のアーキテクチャと、解決すべき課題について述べる。

第 4 章では、SIIT-DC の課題を解決するために考えられる手法を比較・検討する。

第 5 章では、本研究において提案するダイナミックなアドレス変換テーブル広告手法の要件と構成について記述する。またメッセージングプロトコルとして採用した BGP の技術的利点について述べる。

第 6 章では、本提案手法の BGP メッセージペイロードの設計と第 7 章でも評価実験に用いる PoC の具体的な実装について紹介する。

第 7 章では、第 3 章で述べた課題に対して、本提案手法が有用であることを検証するための実証実験の概要及び具体的なシナリオについて述べ、結果を考察する。

第 8 章では、本研究のまとめと今後のロードマップについて検討する。

⁵Border Relay.IP/ICMP 変換アルゴリズムのステートレスモード [10] を実装した機器。

第2章 IPv6 シングルスタックネットワークでのIPv4サービス提供手法

本章ではIPv6 シングルスタックネットワークでのIPv4サービス提供手法を比較し、検討する。

2.1 概要

第1.1.2で述べたように、コンテンツ事業者が運用するIPv6 シングルスタックネットワークの重要な役割の一つに、IPv4 クライアント端末に対するサービス提供がある。

関連して、アクセスネットワーク網ではIPv6 シングルスタックネットワーク上でIPv4によるインターネット接続をクライアントエッジに提供する手法はをIPv4aaS¹と呼称し、様々な手法が検討されている[12]。

一方でコンテンツ事業者が運用するネットワークでのIPv4サービス提供においては下のような要件を満たす必要があるため、必ずしもアクセスネットワークでのIPv4aaSと同様の方法が適切であるとは限らない。

2.1.1 IPv4 サービス提供機構に求められる要件

IPv4 クライアントからのアクセス

IPv4 クライアントに対して透過的にサービスを提供する機構を備える。一般的なサーバークライアントモデルを想定した場合、インターネット上のIPv4 クライアントからサービス提供サーバーに能動的に接続するためには、FQDN²もしくはIPv4 アドレスをIPv4 クライアントが指定出来る必要がある。

¹IPv4 as a Service

²Fully Qualified Domain Name. 完全就職ドメイン名

スケーラビリティ

近年のコンテンツ事業者のネットワークでは、サービスのニーズに合わせて柔軟にスケールアウト³可能な設計であることが重要視されている [13]。同様に IPv4 サービスの提供手法に関しても、事業者の IPv4 サービス規模の変化にあわせて柔軟に拡大・縮小可能なアーキテクチャが求められる。

例えば、第 1.1.2 でも述べたように、将来的に IPv4 クライアントの占める割合が IPv6 クライアントに相対して低下していった場合に、既設の IPv6 ネットワークへの影響を最小限にしつつ、IPv4 サービス提供機構を縮小可能であると望ましい。

IPv4 ネットワークへの非依存性

第 1.1.2 項で述べたように、IPv6 シングルスタックネットワークのメリットを最大限に活かすためには IPv4 サービスを提供する場合においても IPv4 ネットワーク及びアドレスに極力依存しないことが望ましい。

2.2 IPv4 サービス提供手法の分類

想定される IPv4 サービス提供機構をその技術的差異や狙いを基に以下の 3 つの手法に分類した。

2.2.1 L7 リバースプロキシ

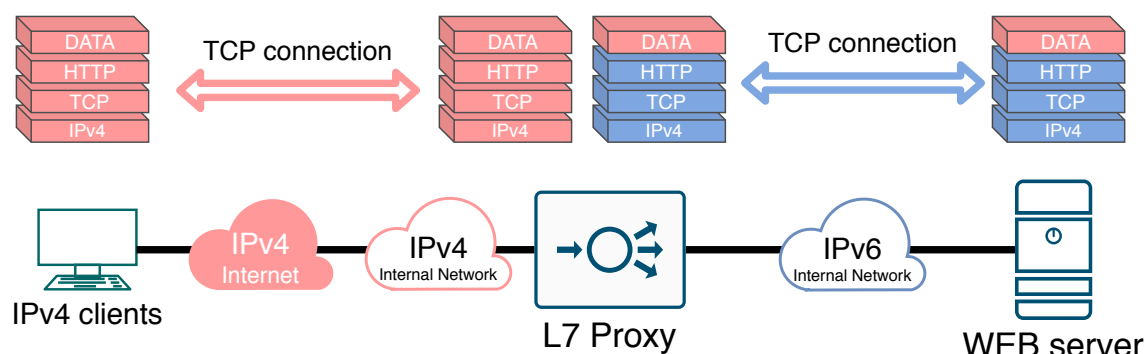


図 2.1: L7 リバースプロキシによる IPv4 サービス提供

L7 リバースプロキシとは、クライアントからの接続をプロキシサーバーがアプリケーション層レベルで終端し、プロキシサーバーがクライアントに代わってサーバーと接続す

³水平スケール。同等性能の機器を増減させることでサービス容量を拡大・縮小可能なモデル。

る機構である [14]。図 2.1 に本手法の構成を簡便に示す。主に WEB サーバーへの HTTP 接続を負荷分散するための手法として広く採用されている。

IPv6 シングルスタックネットワークにおいて IPv4 サービスを提供するためには、IPv4 インターネットとの接続点からプロキシサーバーまでの間に IPv4 ネットワークを配備する必要がある。

IPv4・IPv6 間のプロトコル仕様の差を考慮する必要があるため互換性に留意する必要がある点や、MTU⁴を減らさずにアプリケーショントラフィックを伝送可能である点が利点に挙げられる。

一方でアプリケーションレイヤーでのコネクション終端やそのステート管理を行う必要があるため、プロキシサーバーに負荷が掛かるため高性能な機器の導入が必要になる。

またスケールアウトを可能にするために L4LB と組み合わせた 3 ステージのアーキテクチャ利用する手法が近年主流である [15, 16] が、この手法を採用するためには、ある程度の IPv4 ネットワークを配備する必要があるため、第 2.1.1 項で述べた要件に合致せず、IPv6 シングルスタックネットワークのメリットを損なうことになる。

2.2.2 IPv4/IPv6 トンネリング

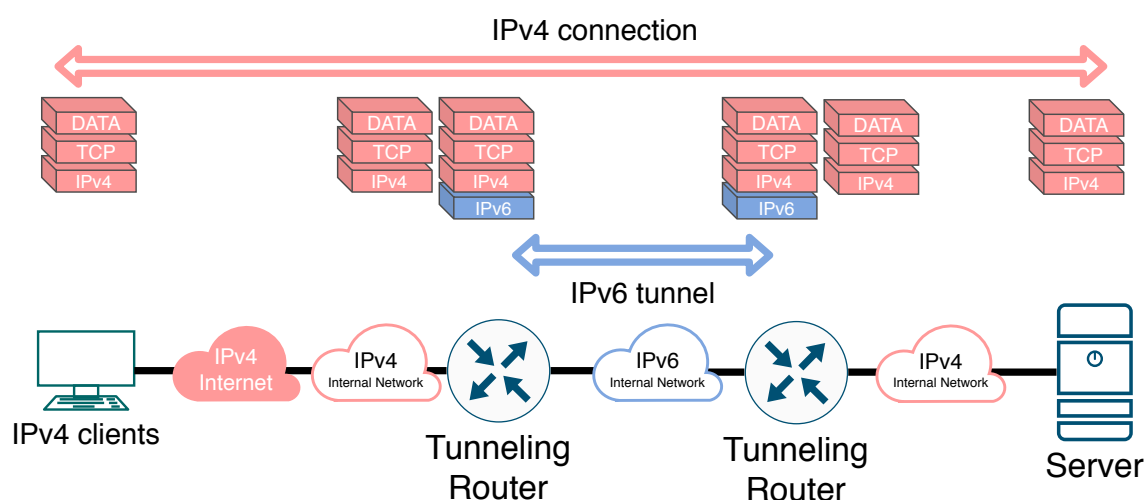


図 2.2: IPv4/IPv6 トンネリングによる IPv4 サービス提供

IPv4/IPv6 トンネリングとは、IPv4 パケットを IPv6 パケットによってカプセリングすることで IPv6 ネットワークを通過させる手法である。IPv4 トラフィックを透過的に利用することが出来るため、アクセスネットワークで最も一般的に利用されている IPv4aaS 手法である [12]。図 2.3 に本提供手法の構成を簡便に示す。

IPv6 シングルスタックにおける IPv4 サービス提供手法としては、IPv4 クライアントから到達したパケットをトンネルルーターによって一度 IPv6 パケットでカプセリングし、

⁴Maximum Transmission Unit. ここでは一つのパケットに搭載可能なデータ量を指す。

IDC 内の IPv6 シングルスタックネットワークを通過させ、IPv4 サービス提供サーバー上もしくはその直前で再びでカプセリングを解くことで、IPv4 提供サーバーまでネイティブな IPv4 トラフィックを通過させる運用が考えられる。IPv4 ネットワークをサーバーで利用できるため、多種多様なアプリケーションでの採用が期待できる。

しかしながら、トンネルルーターと IPv4 サービスサーバー間にある程度の IPv4 ネットワークを配備しなければならず、ToR⁵ 及びサーバーでは IPv4/IPv6 デュアルスタック運用が必要になるため、第 2.1.1 項で上げた要件である「IPv4 ネットワークへの非依存性」に合致しない。また、トンネルプロトコルの多く [17] は基本的に 1:1 もしくは 1:N の接続が基本となるため、水平スケールさせることが困難である。

2.2.3 IPv4/IPv6 トランスレーション

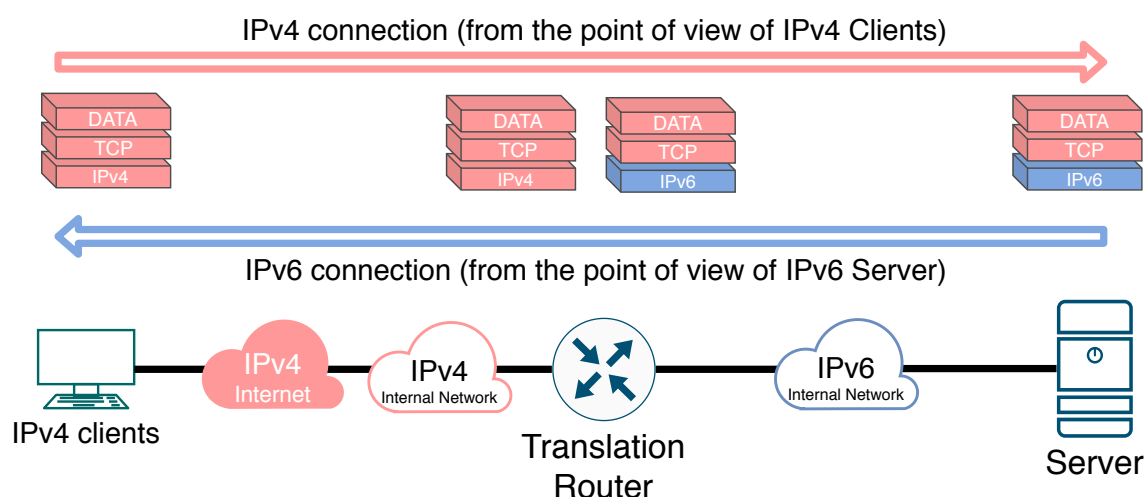


図 2.3: IPv4/IPv6 トランスレーションによる IPv4 サービス提供

IPv4/IPv6 トランスレーションとは、IPv4 パケットと IPv6 パケットを IP/ICMP 変換アルゴリズムを利用して相互に変換する手法である。1: N の関係でアドレス・ポート変換を行うステートフルモード [?] と、1: 1 でアドレス変換を行うステートレスモード [10] が定義されている。IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークの境界に位置する変換ルーターにより、相互にプロトコル変換が行われる。

IPv4/IPv6 トランスレーションでは IPv4 アドレスを IPv6 アドレスとして表現することが要求されるが、変換プレフィックスと呼ばれる IPv6 ネットワークプレフィックスに IPv4 アドレスを埋め込むことで、任意の IPv4 アドレスを IPv6 ホストから認識可能な形で表現する。変換プレフィックスには RFC6052 で定義された 64:ff9b::/96 の他に、運用者が専有可能な GUA⁶ の/96 の IPv6 プレフィックスを利用することが想定されている [18]。

⁵Top of rack switch. ここではサーバーの L2 終端を行うルーターを指す。

⁶Global Unicast Address.

図 2.3 で示すように、変換ルーター以外のホストが IPv4 ネットワークに属する必要が無い¹ため、第 2.1.1 項で述べた「IPv4 ネットワークへの非依存性」の面で、他の 2 手法より優れていると言える。また、IPv4 サービスを行うサーバーから変換ルーターの間はネイティブな IPv6 ネットワークで接続可能なため、ECMP[19] による経路の冗長化が可能²なほか、ステートレスモードでは変換ルーターの水平スケールが可能な点で、IPv6 シングルスタックネットワークにおける IPv4 サービス提供に求められる要件を満たしやすい。

一方で IPv4 と IPv6 のプロトコル実装に差があるため、コンテンツ事業者のサービスの内容によってはサービス影響を考慮する必要がある点は留意すべきである。

第3章 SIIT-DCのデザインと現状の課題

第2.2.3で述べた P_v4/IPv6 トランスレーションを用いた IPv4 サービス提供手法の一つとして、SIIT-DC がインターネット標準化されている。本章では SIIT-DC のデザインとメリット及び考えられる運用，そして現状の課題について述べる。

3.1 SIIT-DC

3.1.1 概要

SIIT-DC とは，ステートレス IP/ICMP 変換アルゴリズム [10] を利用して，IPv4 インターネット・ネットワークからのアクセスを IPv6 シングルスタックネットワーク上のホストに提供するためのネットワークデザインである。2016 年より IETF IPv6 Operations WG¹によりインターネット標準化 (Informational RFC) されている [9]。

SIIT-DC の基本的なアーキテクチャを図(書く)に示す。

3.1.2 用語

SIIT-DC で利用される用語及び特殊な役割を有する機器・技術について述べる。

SIIT

SIIT²とは IPv4/IPv6 トランスレーションに用いられるプロトコル変換機能の略称である。RFC2765[20] で初めて標準化され，その後 RFC6145[21] により一部の仕様が実運用のユースケースに合わせて変更され，現在は IPv6 拡張ヘッダーを扱う機構などが追加された RFC7915[10] が現行の標準仕様である。

¹IPv6 ネットワークの運用要件や関連する技術仕様の策定を行うワーキンググループ。 <https://datatracker.ietf.org/wg/v6ops/about/>

²Stateless IP/ICMP Translation Algorithm

BR

BR³とは、SIIT-DC ネットワークにおいて IPv4 インターネットと IPv6 ネットワークとの間で SIIT による IPv4/IPv6 トランスレーションを行う機器⁴である。IPv4 インターネットと IDC 内の IPv6 シングルスタックネットワークの各境界部に所在し、後述する EAMT を参照した 1:1 のアドレス変換を行う。IDC ネットワークに IPv4 インターネットとの接続点が複数ある場合、接続点ごとに最低一つの BR を配備する。

ER

ER⁵とは、IPv4 ネットワークと IPv6 ネットワークとの境界点において多:多の IPv4/IPv6 トランスレーションを行う機器である。SIIT-DC ではそのオプションとして、IDC ネットワーク内の IPv6 ネットワークと Pv4 しか利用出来ないホストが属する IPv4 ネットワークとの間を接続するユースケースをサポートする SIIT-DC Dual Translation Mode[?] が定義されており、ER はその中での利用が想定されている。

EAM

IPv4 サービスアドレス

IPv6 サービスアドレス

Translation Prefix

本研究では Translation Prefix を変換プレフィックスと呼称する。

3.1.3 BR の動作

3.1.4 ネットワーク設計

3.2 SIIT-DC の問題

とにかく EAMT がダイナミックじゃないことに起因すると言う変更追従性の欠如一貫性の欠如

³Border Relay

⁴専用機器もしくは他の役割を有する機器の一機。

⁵Edge Relay

第4章 手法の検討

SIIT-DC にコントロールプレーンを作る手法の検討を行う

4.1 概要

第5章 提案手法

本章では提案手法の設計を述べる.

5.1 概要

第6章 プロトコル設計と実装

本章では，提案システムのメッセージ設計と実装について述べる．

6.1 実装内容

第7章 評価

本章では，本研究の評価を行う

7.1 評価要件

第8章 結論

本章では，本研究のまとめと今後の課題を示す．

8.1 本研究のまとめ

8.2 本研究の課題

謝辞

俺に関わった全てに感謝

参考文献

- [1] potaroo. Ipv4 address report. <https://ipv4.potaroo.net/>. 最終閲覧: 2019-12-17.
- [2] Cisco. Cisco visual networking index: Forecast and trends, 2017–2022 white paper, 2017. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>.
- [3] Felipe Alonso and John Boucher. Business continuity plans for disaster response. *The CPA Journal*, 71(11):60, 2001.
- [4] 石田慶樹, 吉田友哉, and 西田圭. 日本のインターネットは本当にロバストになったのか? In *JANOG 44 ミーティング*, 2019. <https://www.janog.gr.jp/meeting/janog44/application/files/7715/6577/5523/janog44-robust-ishida-01.pdf>.
- [5] IANA. Ipv4 recovered address space. <https://www.iana.org/assignments/ipv4-address-space/ipv4-address-space.xml>, 2019. 最終閲覧: 2019-12-17.
- [6] Lee Howard and Time Warner Cable. Internet access pricing in a post-ipv4 runout world. *White Paper*, 2013.
- [7] Alain Durand. Deploying ipv6. *IEEE Internet Computing*, 5(1):79–81, 2001.
- [8] Google. Ipv6 statistics. <https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>. 最終閲覧: 2019-12-18.
- [9] Tore Anderson. SIIT-DC: Stateless IP/ICMP Translation for IPv6 Data Center Environments. RFC 7755, February 2016.
- [10] Congxiao Bao, Xing Li, Fred Baker, Tore Anderson, and Fernando Gont. IP/ICMP Translation Algorithm. RFC 7915, June 2016.
- [11] Yakov Rekhter, Susan Hares, and Tony Li. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). RFC 4271, January 2006.
- [12] Jordi Palet, Hans M.-H. Liu, and Masanobu Kawashima. Requirements for IPv6 Customer Edge Routers to Support IPv4-as-a-Service. RFC 8585, May 2019.

- [13] A. Vahdat, M. Al-Fares, N. Farrington, R. N. Mysore, G. Porter, and S. Radhakrishnan. Scale-out networking in the data center. *IEEE Micro*, 30(4):29–41, July 2010.
- [14] Katja Gilly, Carlos Juiz, and Ramon Puigjaner. An up-to-date survey in web load balancing. *World Wide Web*, 14(2):105–131, Mar 2011.
- [15] Patrick Shuff. Building a billion user load balancer. Dublin, May 2015. USENIX Association.
- [16] Daniel E. Eisenbud, Cheng Yi, Carlo Contavalli, Cody Smith, Roman Kononov, Eric Mann-Hielscher, Ardas Cilingiroglu, Bin Cheyney, Wentao Shang, and Jinnah Dylan Hosein. Maglev: A fast and reliable software network load balancer. In *13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 16)*, pages 523–535, Santa Clara, CA, 2016.
- [17] N. Chuangchunsong, S. Kamolphiwong, T. Kamolphiwong, R. Elz, and P. Pongpaibool. Performance evaluation of ipv4/ipv6 transition mechanisms: Ipv4-in-ipv6 tunneling techniques. In *The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN2014)*, pages 238–243, Feb 2014.
- [18] Xing Li, Mohamed Boucadair, Christian Huitema, Marcelo Bagnulo, and Congxiao Bao. IPv6 Addressing of IPv4/IPv6 Translators. RFC 6052, October 2010.
- [19] Christian Hopps. Analysis of an Equal-Cost Multi-Path Algorithm. RFC 2992, November 2000.
- [20] Erik Nordmark. Stateless IP/ICMP Translation Algorithm (SIIT). RFC 2765, February 2000.
- [21] Xing Li, Fred Baker, and Congxiao Bao. IP/ICMP Translation Algorithm. RFC 6145, April 2011.