

第 XXXV 部

10G 広帯域グローバルテストベッド

第 35 部

10G 広帯域グローバルテストベッド

第 1 章 テストベッドの目的

10G 超広域広帯域テストベッドは、NTT グループ殿や PoweredCom 殿、あるいはグローバルアクセス (GAL) 殿をはじめとする多数の協力組織と共同して、WIDE Project で、共同で運用しているものである。本テストベッドは、クローズドなテストベッドではなく、ほかの研究開発ネットワークや商用のネットワークとの相互接続を行うことによって、より実践的で商用展開を念頭においた最先端技術の研究開発を、目指すものである。本テストベッドは、当然のことながら、研究開発を目的としたものであり、商用利用は行わない。また、ほかの研究開発ネットワークとの相互接続を行うにあたっては、それぞれのネットワークごとに、AUP (Access User Policy) を定義しており、この AUP に合致したパケットの転送に関する制御を行う技術を確立することは、商用ネットワークを含む実ネットワークにおける経路制御技術の確立に資する運用形態である。

1.1 本実験テストベッドの位置づけ

本実験テストベッドは、WIDE Project が運用する実験テストベッドの中の、超高速バックボーンとして位置づけられている。すなわち、10 Gbps クラスの超高速リンクのみで構成されるネットワークではなく、低速なリンクや、種々のリンク技術が相互に接続された環境での運用を行うことで、より現実に近い実践的なネットワーク環境を構築している。

技術の研究開発と確立には、大きく以下のような、4 つの段階を持つ。本テストベッドは、第 1 段階のテストベッドに資するものであり、最先端のネットワーク技術を開発するとともに Professional な品質まで向上させることを目的としている。

第 1 段階：

最先端技術の創造と検証を行い、実アプリケーションを用いて、その有効性や有用性の検証を

行うとともに、Professional Quality の運用に資するレベルの運用技術の確立を行う。本テストベッドや、IEEAF/GLIF などが、この部類のテストベッドに該当する。

第 2 段階：

第 1 段階のテストベッドで確立された技術を、さらに、確立し、ビジネス展開が可能なレベルにまで向上させ、確立することを目的とする。商用化に向けた具体的な機能の作りこみなどは行わないが、基本技術は、商用運用に耐えうるものにする。JGNII や Internet2、あるいは APAN がこの段階のテストベッドに該当する。

第 3 段階：

商用サービスにおいては、トライアルサービスに該当する段階である。商用運用に耐えうるような要素技術の確立は基本的には達成されているが、具体的な商用運用に必要な関連技術の検証や、商用運用に向けた技術の検証と確立を行う。IPv6 普及高度化推進協議会の実験テストベッドや、プロバイダにおけるトライアルサービスネットワークが、これに該当する。

第 4 段階：

実際の商用ネットワークでの運用の段階である。ネットワークの構築方法、既存のネットワークへの展開方法、課金を含めた商用での運用を行う段階である。商用運用には、コスト面、運用保守面などの評価と検証が行われなければならない。

上記のネットワークの段階とテストベッドの役割を十分理解した上で、適切な研究開発や技術の評価や検証を行う必要がある。また、これら、異なる段階のネットワークは、独立に運用されるのではなく、相互に接続されながら、その上での安定した運用を可能とする運用技術や制御技術の確立を行わなければならない。

どの段階のネットワークにおいても、異なるベンダ、異なる製品、異なるネットワークプロバイダ間での相互接続性の検証評価と確立は、オープンネットワークにおける信頼性の向上とコストダウンという観点において、非常に重要な点として挙げられる。

とくに、第 1 段階のテストベッドと第 2 段階のテストベッドにおける、マルチベンダ環境やマルチプロバイダ環境における相互接続性の確認は、次の商用ネットワークの設計と構築に関して、非常に重要な意味を持つため、可能な限り、マルチベンダ環境でのネットワークの設計と構築ならびに運用を目指す必要がある。しかしながら、相互接続性の検証評価とその確立に関しては、2 つの段階のテストベッドにおいて、必ずしも同一のレベルおよび基準である必要はない。むしろ、そこには、違いがあつてしかるべきである。第 1 段階においては、基本的には、Professional な運用に耐えうるレベルでの相互接続性の確立と、ある限定されたシステム間での相互接続性の確立で基本的に十分である。一方、第 2 段階においては、ある程度の網羅性を持った形での、相互接続性の検証評価と確立が行われなければならない。本テストベッドと JGNII とを比較した場合、本テストベッドでは、数社の異なるベンダの機器を用いたテストベッドの構築と運用ならびに評価検証で十分であるといえるが、JGNII のテストベッドにおいてはその時点で利用可能なシステムを用いた網羅的な検証評価と運用が行われる必要がある。

1.2 研究開発ならびに確立される技術要素

本テストベッド自身、とくに、10 Gbps の冗長バスを構成可能なトポロジのネットワークを用いて確立される要素技術と、ほかのネットワーク部分やほかのテストベッドとの相互接続を通じて確立される要素技術に分けて考える。当然ではあるが、この両方の面での技術の確立が、重要となる。

最先端の商用サービスやベータレベルに近いプロダクトを用いたネットワークの設計と構築ならびに運用は、その技術の解決すべき問題点、その技術の可能性、さらに、その技術の導入によって新たに発生する問題点などを顕在化することができる。顕在化する問題 / 課題は、実運用の中で、新たに発生するものも少なくなく、これが、テストベッドを用いた実証実験を行う意義 / 効果の 1 つでもある。すでに、これまでの運用を通じて以下のような要素技術が、課題 / 問題点として顕在化している。

(1) 本テストベッド自身から確立される要素技術

- (a) Un-Protected ネットワーク環境における運用
通常商用サービスで提供されるデータリンクは、いわゆる SONET/SDH を基本とし

たリング型ネットワークポロジを用いた Protected Network サービスが提供されるが、今回の 10 Gbps Ethernet サービスにおいては、Protected なサービス自体が存在せず、通常の運用形態ではない Un-Protected 型のデータリンクサービスでのネットワーク設計と運用となっている。これが、本質的に、本テストベッドがトライアングル構成でなければならない必然的な理由の 1 つである。詳細は、1.3 節に記述する。

(b) ノードの実装アーキテクチャ

エンドステーションは、デジタル計算機である。現在の計算機のアーキテクチャは、基本的には、プロセッサやモジュールを高速バスで相互接続し、モジュール間でデータの交換処理を行わなければならない。外部との通信速度が Gbps までは、通常の計算機アーキテクチャを用いて、適切なパラメータチューニングを行うことで、対応することが可能であるが、10 Gbps クラスにおいては、ルータやスイッチにおける実装技術における困難度の上昇と同じく、エンドステーションにおいても、ソフトウェアおよびハードウェアの両面における新しい実装技術が必要となる領域となっている。

(c) 広帯域通信のためのプロトコル

いわゆるファットパイプ環境において、良好なデータ転送を実現するには、現在のデータ通信で適用されている TCP/IP のプロトコルスタックでは、十分な性能を達成できないことが、明らかとなっている。本テストベッドでも、すでにその問題が顕在化している。たとえば、TCP におけるウィンドウ幅の拡張や Congestion Window の Aggressive な増加手法、あるいは、ジャンボグラムの利用など、通信プロトコルの修正を行う必要がある。このような修正は、すべてのネットワーク機器において対応可能なものでは必ずしもなく、このような実践的で具体的な修正を、ネットワークの構成や運用方法を考慮に入れて、対応する必要が発生している。とくに、シングルベンダで、特定のネットワーク機器を仮定して研究開発される機器を、実ネットワークに導入すると、さまざまなパラメータの不一

致や予期しない技術的な問題（実装の違いなど）が顕在化する。実際に、本テストベッドにおいても、HDTV 映像のリアルタイム転送において、大きな転送パケットサイズに、ネットワーク機器が対応できていなかったことによる問題などが、明らかとなった。

(d) バックアップ経路の確保

超広帯域なリンクを持つネットワークにおいて、バックアップ経路の確保は、ますます困難度の高い問題となっている。バックアップ経路の確保に関しては、ほかのテストベッドとの協調が必須となることが、実運用を通じて、明らかとなってきている。

(e) クリアチャンネルと共有チャンネル

広帯域なパケット通信においては、パケットの廃棄や遅延に関する要求が一般的に厳しくなる。これは、広帯域通信においては、相対的にバッファ容量のコストが大きくなってしまいうためと、フィードバック制御の動作に必要な次定数が、相対的に多くなってしまいうからである。したがって、このような問題に対処するために、トラフィックエンジニアリング、優先転送制御などの技術が必要となる。また、今日のデータリンクのコスト低下は、とくにハイエンドなアプリケーションの提供において、クリアチャンネル (Clear Channel) をエンドエンドに提供するアプローチが採用されるケースが、ほかのテストベッドにおいては見受けられる。一方、本テストベッドでは、インターネットにおけるパケット通信のアーキテクチャに基づいた、共有チャンネル (Shared Channel) の設定と、経路制御を適用した運用を行っている。

(f) 経路制御アーキテクチャ

上記、クリアチャンネルと共有チャンネルの問題も含め、ドメイン内部での経路制御の問題は、これだけ大きな帯域幅のダイバーシティ (Diversity) の環境においては、重要な技術課題となる。

(2) ほかのネットワークやテストベッドとの相互接続を通じて確立される要素技術

(a) 広帯域通信のためのプロトコル

とくにインタードメインにおいて、広帯域なデータ通信の提供は、インターネットの本質的な技術課題の 1 つである。とくに、隣接す

るネットワーク以外のネットワークとの間でのデータ通信における、良好な通信環境の提供は、困難な技術課題である。

(b) バックアップ経路の確保

インタードメイン環境における超広帯域な通信に対するバックアップ経路の確保は、ますます困難度の高い問題となっている。バックアップ経路の確保に関しては、ほかのテストベッドとの協調が必須となることが、実運用を通じて、明らかとなってきている。

(c) クリアチャンネルと共有チャンネル

広帯域なパケット通信においては、パケットの廃棄や遅延に関する要求が一般的に厳しくなる。これは、広帯域通信においては、相対的にバッファ容量のコストが大きくなってしまいうためと、フィードバック制御の動作に必要な次定数が、相対的に多くなってしまいうからである。したがって、このような問題に対処するために、トラフィックエンジニアリング、優先転送制御などの技術が必要となる。また、今日のデータリンクのコスト低下は、とくにハイエンドなアプリケーションの提供において、クリアチャンネル (Clear Channel) をエンドエンドに提供するアプローチが採用されるケースが、ほかのテストベッドにおいては見受けられる。一方、本テストベッドでは、インターネットにおけるパケット通信のアーキテクチャに基づいた、共有チャンネル (Shared Channel) の設定と、経路制御を適用した運用を行っている。このような、複雑で、デリケートな経路制御をインタードメインで実現するためには、新しいパラダイムに基づいた経路制御技術の確立が必要となることが、実ネットワークの運用から、ますます明らかになった。現在は、人手によりマニュアルによる構成の変更や設定を行わざるをえない状況である。

(d) 経路制御アーキテクチャ

上記、クリアチャンネルと共有チャンネルの問題も含め、インタードメイン環境での経路制御の問題は、運用ポリシおよび利用可能な帯域幅の大きなダイバーシティ (Diversity) の環境においては、重要な技術課題となる。本年度研究を行った、トラフィックエンジニアリ

グを容易にするトラフィックエンジニアリングを目的とした経路制御アーキテクチャのフレームワークを第 4 章で報告する。

1.3 Un-Protected 環境での運用

通常の商用サービスで提供されるデータリンクは、いわゆる SONET/SDH を基本としたリング型ネットワークトポロジを用いた Protected Network サービスが提供されるが、今回の 10 Gbps Ethernet サービスにおいては、Protected なサービス自体が存在せず、通常の運用形態ではない Un-Protected 型のデータリンクサービスでのネットワーク設計と運用となっている。これが、本質的に、本テストベッドがトライアングル構成でなければならない必然的な理由の 1 つである。

すなわち、サービスプロバイダが提供する高品質な Protected サービスを前提にした、イントラドメインおよびインタードメインでの運用制御技術の確立が必須となる。サービスプロバイダのサービスに依存せずに、Protected なサービスを、インタードメインで提供せざるをえないことは、2005 年 1 月 17 日-18 日に大阪で開催された JGNII シンポジウムにおける HDTV 映像のリアルタイム伝送デモンストレーションシステムの設計、構築、ならびに運用の中で証明されることとなった。

本デモンストレーションにおいては、当初、国際回線として東京 = シカゴ間の OC-192 リンク (10 Gbps) の利用を計画していた。しかし、1 月初旬に発生した、米国内での天災のために、当初バックアップ映像の伝送用に設計していた IEAAF/GLIF の回線を、急遽、HDTV ストリームをクリアチャネルで伝送するためのリンクとして利用せざるをえない状況となった。同様に、長野県での地震においては、JGNII の北陸への 2 つの経路のうち、1 つの経路が障害のため不通となったが、その際、Protected のバックアップパスを提供できないということも実際に発生している。このように、Dark Fiber の利用や Un-Protected サービスの利用が、このような超広帯域の領域で展開されるようになると、ネットワーク同士が協調して、障害時への対応を行うことが必要であることが明確となり、このような技術の確立が重要であることも認識された。

1.4 相互接続性

ネットワーク機器間での相互接続性確保に向けた検証や評価は、技術の実用展開という観点で、きわめて大きな意味を持つとともに、大きな貢献を行う。健全な競争環境と、ユーザにとっての機器 / サービスの選択性と冗長性を提供するためのマルチベンダ環境における相互接続性の確保と確立は、公共性を持つテストベッドに課せられた重要なミッションの 1 つである。相互接続性は、単体の機器のみならず、運用方法、運用技術、さらにネットワーク間において実現・確立されなければならない。とくに、商用のネットワーク、商用のトライアルサービス、JGNII のような Professional Quality なテストベッドとの相互接続の実現は、汎用性の高い実用的な運用技術の確立に関して、大きな寄与をする。

第 2 章 本テストベッドに関わる先端的テストベッドとの相互接続

本テストベッドは、国内外のテストベッドや商用のネットワークとの相互接続を行っている。ここでは、とくに、最先端のテストベッドとの相互接続の状況とその運用ポリシーに関する報告を行う。

2.1 T-LEX (<http://www.t-lex.net/>)

2004 年に、WIDE Project によって構築され、運用を開始したラムダイクスチェンジポイントである。国内外の超広帯域ネットワークを相互接続している。本テストベッドも、T-LEX を通じて、国内外の広帯域テストベッドとの相互接続を行っている。

2.2 JGNII (<http://www.jgn2.jp/>)

1999 年から 5 年間運用された総務省と通信放送機構が運用した JGN の後継となる研究開発用のテストベッドである。国内のバックボーンは、最高で 20 Gbps の伝送容量を持ち、2004 年 8 月からは、米国シカゴの StarLight に 10 Gbps (OC-192) で接続された。JGNII は T-LEX を経由して、本テストベッドとの相互接続を実現している。

2.3 WIDE Project (<http://www.wide.ad.jp/>)

本テストベッドは、WIDE Project のネットワークのバックボーンの一部としても機能している。異なる技術を用いた 10 Gbps のネットワークとの相互接続も実現させている。このネットワーク構成は、クリアチャネルの提供ではなく、共有チャネルを用いた 10 Gbps パケットネットワークを構成している。

2.4 StarLight

STARTAP の後継となる最先端のオプティカル技術を利用した国際的なイクスチェンジサービスを行う基盤である。シカゴの North Western 大学が拠点となり、国際的な相互接続点として機能している。JGNII の国際線は、この拠点に接続されている。

2.5 IEEAF/GLIF

Internet Educational Equal Access Foundation は、商用のプロバイダやベンダ、ならびに大学などの研究機関が協力して、グローバルな研究テストベッドを提供するというプロジェクトである。既に、日本、北米(米国、カナダ)および欧州(オランダ、スイス、英国、スウェーデンなど)が、10 Gbps クラスの超広帯域リンクで相互接続されている。IEEAF のアジアにおける拠点であり相互接続点として、T-LEX が設計構築され、実運用されている。また、IEEAF と密接な関係を持っているのが、GLIF(Global Lambda Integrated Facility)である。最新のオプティカル技術を用いて、グローバルな共有ネットワーク環境を構築し運用している。

2.6 APAN

アジア太平洋の研究開発テストベッドの集合体である。ネットワークを相互接続、共有することで、グローバルな協調研究を推進する組織である。JGNII も APAN のリンクオーナーの組織となっている。

研究科 助教授 江崎浩)と共同して、本プロジェクトは、2005 年 1 月 17 日(月)-18 日(火)に大阪国際会議場で開催された JGN II Symposium 2005 in Osaka において、日米の研究組織の協力を得て、非圧縮の高精細映像(HDTV; High Definition TV)伝送技術を用いた 2 つのインタラクティブな遠隔講演を行った。

本遠隔講演は、高速データ通信回線として、本テストベッドのほかに、情報通信研究機構(NICT)開発用超高速テストベッドである JGNII(Japan Gigabit Network: 研究開発用ギガビットネットワーク) PoweredCom/WIDE Project 共同実験用回線、APAN、ワシントン大学、IEEAF、T-LEX、Pacific Northwest Gigapop、Pacific Wave、StarLight、NLR のネットワークを利用して実現された。HDTV 映像のリアルタイム伝送に関しては、日本電信電話(株)、NTT コミュニケーションズ、Pacific Interface 社、ResearchChannel、University of California San Diego Cal-(IT)2 の技術協力を得た。

1 月 17 日(月)には、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス(神奈川県藤沢市)から同大学 環境情報学部 村井純教授が「JGN II: グローバル R&D への貢献と責任」の題目で、1 月 18 日(火)には、米国ワシントン州シアトルのワシントン大学からカリフォルニア大学サンディエゴ校の Larry Smarr 教授が「Using OptiPuter Innovations to Enable LambdaGrid Applications」の題目で、大阪の会場とリアルタイムに会話を進めながら遠隔講演を行った。

HDTV のリアルタイムでの転送には、約 1.5 Gbps の帯域幅を用いた IP パケットの転送が必要である。今回は、1 月上旬(本番の約 2 週間前に)、米国内での集中豪雨による洪水のために、日米回線(OC-192)の切断というアクシデントにも見まわれた。本遠隔講演では、日米の研究開発機関が運営する最先端のオプティカルインターネット技術を利用し、さらに、これらを相互接続することによって、参加組織の数や伝送距離など、世界最高水準の遠隔講演を、実質の準備期間が 1 ヶ月未満という条件にて実現することに成功した。システムおよびネットワークの相互接続、ネットワークインフラストラクチャのチューニングは、慶應義塾大学、東京大学をはじめとした多くのコラボレーションによって実現した。

今後は、超高速インターネットテストベッド環境のグローバルな整備の推進と関係研究組織間での協

第 3 章 HDTV を利用したリアルタイム遠隔講演デモ

WIDE Project(代表:慶應義塾大学 教授 村井純、本件責任者:東京大学 大学院 情報理工学系

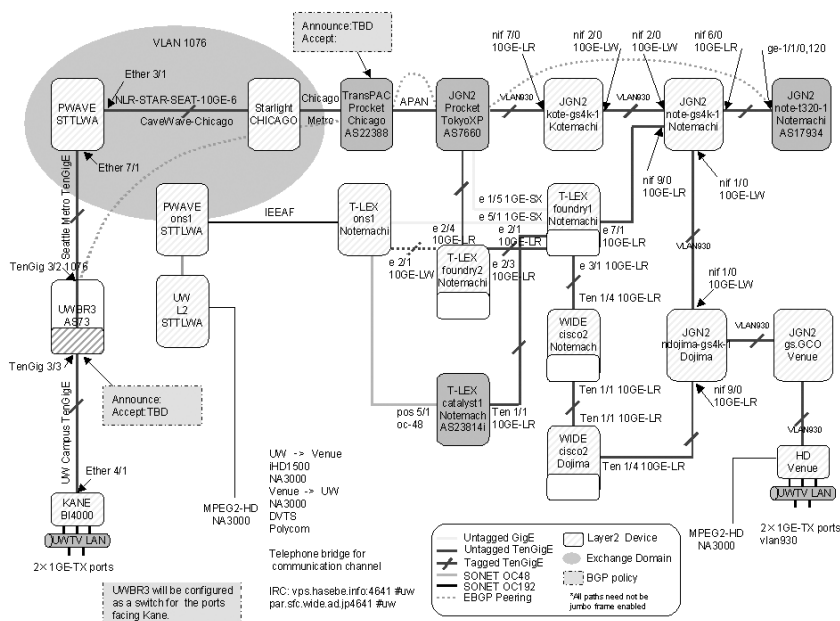


図 3.1. 非圧縮 HDTV 映像のリアルタイム転送デモのシステム構成

力関係の強化、さらにネットワーク運用技術の研究開発を推進するとともに、HD 映像リアルタイム転送システムの IPv6 化やマルチキャスト化あるいは 3D 化などの高機能化への取り組みなど、グローバルスケールでの超広帯域インターネット基盤技術の確立を目指し、グローバルなインターネットコミュニティの発展への貢献を目指す。

デモンストレーションにあたっては、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスと大阪の国際会議場との間でのデータ転送経路と、ワシントン大学と大阪の国際会議場との間でのデータ転送経路は、JGNII のインフラと本テストベッドを互いに補完しあいながらトラフィックエンジニアリングを行った。また、デモンストレーションにあたっては、プライマリ系は HDTV の 1.5 Gbps のパケットストリームであるが、これ以外に、圧縮された HDTV シグナルと DVTS を用いた DV シグナルの 3 種類の映像信号を、可能な限り重ならない経路を用いて転送した。また、プライマリである HDTV のパケットストリームは、Clear Channel と Shared Channel の両方を用いて実施した。

1. Clear Channel : ワシントン大学 = 大阪
2. Shared Channel : 慶應義塾大学湘南藤沢 = 大阪

第 4 章 誘導経路情報を用いたインターネットパス制御アーキテクチャ

(注意) 本章と同様の内容の論文は、電子情報通信学会 和文論文誌 B に投稿されている (2005 年 1 月)。

概要

インターネットシステムにおける経路制御は、ますます複雑化するインターネットの構造と要求に対応しなければならない。しかし、現在の経路制御システムはグローバルスケールで、宛先アドレスをルートとしたスパンニングツリー型のパスを形成するために、必ずしも自由なパスの制御(トラフィックエンジニアリング)や Ingress 側での迅速なトラフィックの制御を実現することが容易ではない。本論文では、エニキャストの概念を拡張した誘導経路情報の広告を用いたインターネットパス制御アーキテクチャ (IRIDES; Invitation Routing Information aDvertisement for path Engineering System) の提案を行っている。誘導経路情報を用いて、送信ノードにより近いポイント(誘導ポイント)において、トラフィックエンジニアリング可能なルーティング空間(誘導空間)に IP パ

ケットを誘導する。誘導空間におけるトラフィックエンジニアリングは、任意の手法を用いて実現することができる。提案アーキテクチャは、既存の経路制御システムとの共存が可能であり、十分なスケーラビリティを持つ。さらに、提案アーキテクチャをもとに、いくつかの具体的なアプリケーション(e.g., マルチエージェント型マルチホーム NEMO/MIP)が実現されることを示す。

4.1 問題意識

TCP/IP を基盤技術とするインターネットシステムは、エンドツーエンドアーキテクチャを基本原理として、1980年代後半から驚異的な成長を遂げてきた。その成長は、インターネットに接続されるノードの数とネットワークの数のみならず、その利用者の多様性の増大に関しても著しいものがある。インターネットの成長とともに、インターネットシステムにおいて、その根本的な機能を提供するルーティング制御技術(経路制御技術)も、変遷を遂げてきた。インターネットが運用を開始した当初は、ノードのインタフェースを識別するための IP アドレス長は 4 ビットであり、今日広く利用されている動的経路制御は適用されず、すべて、Static Routing で運用することができたし、ノードの IP アドレスの解決は、DNS のようなディレクトリサービスを利用することなく、Static なテーブルを各計算機のファイルに書き込む形態であった。やがて、インターネットシステムの成長とともに、IP アドレスは、8 ビットに拡張され、その後、32 ビット [251] に拡張されて、今日、128 ビットのアドレス長 (IPv6) [56] へと拡張された。その過程で、グローバルな IP アドレスと計算機の論理的な名称 (FQDN; Fully Qualified Domain Name) のマッピング情報を提供する DNS システム [205] が導入された。

一方、経路制御システムは、当初の Static Routing 方式のみで運用されたが、やがて、ネットワークの状況に応じて、到達可能な最適の経路を自動的に決定して、IP パケットの転送経路の制御と管理を行う、動的経路制御が導入されるようになった。現在でも、Static Routing (あるいは Default Routing) は、実際のネットワーク運用において、広く適用されているが、経路の冗長さの確保や宛先ネットワークへの接続性の確保を実現するために、インターネットのコア部では、動的経路制御が適用されているのが一般

的である。動的経路制御として、インターネットにおいて、現在広く適用されているプロトコルは、IGP (Interior Gateway Protocol) としては RIP [186] および OSPF [215]/ISIS [234] であり、EGP (Exterior Gateway Protocol) としては BGP [256] である。これらのプロトコルは、それぞれ固有の経路決定アルゴリズムを採用しているが、根本的には、すべて共通のアーキテクチャを適用することで、大規模化(スケーラビリティ)への対応を行っている。これは、宛先 IP アドレスのみを用いた経路表の作成/管理と、それに基づいた IP パケットの転送処理である。これは、宛先ノードをルート(頂点)とする、スパニングツリーをグローバルに形成することによって、経路制御の複雑度をオーダー $O(n)$ に押さえ込んでいる。ただし、ここで、 n は、経路制御ドメインに存在するノード/ネットワークの数を表す。

ますます複雑化および多様化するインターネットの構造と要求に対して、インターネットシステムにおける経路制御は、適切に対応することが要求されている。しかし、現在の経路制御システムは、上述の通り、グローバルスケールで宛先 IP アドレスをルートとしたスパニングツリー型のパスを形成するために、必ずしも自由なパスの制御(トラフィックエンジニアリング)や、DoS 攻撃に対する Ingress 側での迅速な制御など、現在のインターネットシステムが必要としている機能を実現することが容易ではない。これまで、インターネットにおける経路制御システム全体の抽象化を行い問題点の整理が行われず、解決すべき技術課題に対応するための具体的な手法やアーキテクチャの提案と実装および適用は、ある意味、アドホックに行われてきた。その結果、本質的には、同じ手法やアプローチを用いているにも関わらず、個別の技術エレメントに整合性がなく、それぞれ、個別の技術が新たに提案され適用されてきた。

そこで、本論文では、改めて、現在のインターネットで適用されている経路制御アーキテクチャの整理と抽象化を行い、その問題点と新たな要求条件を整理し、その一般的な解決手法を整理し抽象化した形で提案することを目的としている。具体的には、エニキャストの概念を拡張した誘導経路情報の広告を用いたインターネットパス制御アーキテクチャ (IRIDES; Invitation Routing Information advertisement for path Engineering System) の提案を行っている。誘導経路情報を用いて、送信ノードにより近いポイント

(誘導ポイント)において、トラフィックエンジニアリング可能なルーティング空間(誘導空間)に IP パケットを誘導する。誘導空間におけるトラフィックエンジニアリングは任意の手法を用いて実現することができる。提案アーキテクチャは、既存の経路制御システムとの共存が可能であり、十分なスケーラビリティを持つ。さらに、提案アーキテクチャをもとに、いくつかの具体的なアプリケーション(e.g., マルチエージェント型マルチホーム NEMO/MIP)が実現されることも示す。

以下が本章の構成である。4.2 節では、現在広く利用されているインターネット経路制御技術の抽象化とその問題点ならびに要求条件を明らかにする。4.3 節では、IRIDES アーキテクチャの具体的な提案を行う。4.4 節では、IRIDES アーキテクチャを適用した、個別の経路制御の技術課題の解決手法の具体例を示す。4.5 節では、本章の結論を述べる。

4.2 インターネット経路制御技術の問題点

4.2.1 既存の経路制御技術の分析

本節では、本章で提案するアーキテクチャに関連する 2 つの既存経路制御技術の特徴を整理する。

Destination-Based Routing

インターネットにおいて、現在広く適用されている経路制御プロトコルは、IGP (Interior Gateway Protocol)としては RIP と OSPF/ISIS であり、EGP (Exterior Gateway Protocol)としては BGP である。RIP は Distance Vector 方式、OSPF および ISIS は Link State 方式、さらに BGP は Path Vector 方式といった、それぞれに異なる固有の経路決定方式を用いている。一般的に、(大規模な)AS 内部での経路制御では OSPF および ISIS が、一方、AS 間での経路制御では BGP が適用されている。これらの経路制御プロトコルは、異なる経路決定方式を用いているが、根本的には、宛先 IP アドレスのみを用いた経路表の作成/管理と、それに基づいた IP パケットの転送処理を行っている。すなわち、一見異なる経路制御決定方式を用いているように見えるが、すべて共通のアーキテクチャを適用することで、大規模化(スケーラビリティ)への対応を行っているといえよう。具体的には、宛先ノード(あるいはネットワーク)をルート(頂点)とする、スパニングツリー(Spanning Tree)を、与えられたルーティングドメインにおい

て形成することによって、経路制御の複雑度をオーダー $O(n)$ に押さえ込んでいる。Inter-Domain ルーティングを司る BGP における Default-Free な運用形態では、いわゆるフルルート(Full Routes)を隣接する(Peering している)BGP ルータと相互交換することで、基本的にはグローバルスケールのスパニングツリーを管理している。一方、Intra-Domain を司る OSPF や ISIS では、そのルーティングドメイン内部のネットワークにおけるスパニングツリーの管理を行っている。

スパニングツリーは、閉じたトポロジ部分を持たない開放型のトポロジ構成を持つ。スパニングツリーが閉じた部分を持たないので、経路制御プロトコルに要求されるループフリー機能の提供が実現されていると考えることが可能である。すなわち、ルーティングドメイン上のすべてのオブジェクト(=ノードあるいはネットワーク)から、注目する宛先オブジェクト(=ノードあるいはネットワーク)、すなわちツリーの Root ノードへの、ループ(閉じた部分)のないパスを提供することができている。このスパニングツリーは、すべてのリーフ(Leaf)ノード、すなわち、すべての送信元オブジェクトで共有されたスパニングツリーとなっている。送信元オブジェクトごとのスパニングツリーを形成管理することで、ルータが管理すべき経路情報の量のオーダーを $O(n^2)$ から $O(n)$ に削減することに成功しているわけである。これが、インターネット経路制御システムにおける Destination-Based Routing であり、すべての経路制御プロトコルが、この原理を共通に適用している。

経路情報の集約化

もともと各組織は、個別の IP アドレス空間(= Portable IP Address Space)を持ち、このアドレス情報を経路制御情報としてインターネットに対して広告していた。しかし、インターネットの大規模化に伴い、このような個別の IP アドレス空間を各組織がインターネットに広告すると、ルータは、経路テーブルのエントリとして組織ごとにエントリを生成/管理しなければならなくなってしまう。そこで、この問題を解決するために、アドレスの集約化(Address Aggregation)が適用されるようになった。これは、インターネットの成長に伴う経路表の増大に対応するための運用方法である。アドレスの集約化を実現するために、IP アドレス空間は、各組織が独立に取得管理

するものではなく、集約化を行うネットワーク単位ごとに行い、そのネットワーク単位に属する組織は、そこから IP アドレスの部分空間を割り当ててもらった形態が一般的になってきた。集約化を行うネットワーク単位は、一般的には、ISP (Internet Service Provider) や NIR (National Internet Registry) となり、最上位は 3 つの RIR (Regional Internet Registry) となる。したがって、結果的に、IP アドレス空間に関して、階層的なツリー構造が構築されていると見ることができる。なお、経路制御における IP アドレスの集約化によって、このような IP アドレス空間の階層構造と IP パケットの転送経路との間には強い相関関係が構築されることになる。

経路制御システムへの要求事項

インターネットシステムにおける経路制御は、ますます複雑化および多様化するインターネットの構造と要求に対して、適切に対応できることが要求されている。これまでの議論の通り、現在の経路制御システムは、以下の 2 つの技術的な特徴 (= 制約) を持っている。

- ルーティングドメイン内において、宛先オブジェクト (= 宛先ノードや宛先ネットワーク) をルートとした、すべての送信元オブジェクトで共有されたスパンニングツリーパスを生成管理している。
- グローバルスケールに、階層的な IP アドレス空間の割り当てが行われている。

インターネットの経路制御システムは、この 2 つの技術的な制約を持つために、さまざまな課題が顕在化し、これまで、それぞれの課題に対してアドホックな対応がとられてきた。これらの課題は、以下の 3 点に集約化することができる。

1. 共有されない転送パスの提供

宛先オブジェクトごとに管理されるスパンニングツリー上のパスに依存しない IP パケットの転送パスの提供は、トラフィックエンジニアリングに必要となる重要な要素技術の 1 つである。現在の経路制御システムでは、異なる送信元オブジェクトから、同一の宛先オブジェクトに向けて転送される IP パケットは、共通のパス (スパンニングツリー) を共用しなければならなくなってしまう。宛先オブジェクトへの複数の IP パケット転送パスの提供は、シングル ISP 内でのサービス品質提供の冗長度の向上に貢献するだ

けではなく、複数の ISP が関与するマルチホーム環境の提供における通信品質の向上にも貢献する。

2. プラグアンドプレイ環境の提供

IP アドレス空間の階層化と集約化に伴い、オブジェクト (ノードあるいはネットワーク) の、物理的あるいは論理的な移動時には、該当するオブジェクトシステムにおいて、IP アドレスのリネンバリングなど、さまざまな、ネットワーク関連の設定変更を行う必要がある。オブジェクトの論理的な移動は、物理的な移動時には、ほぼ、必然的に発生するが、物理的な移動がともなわない場合でも、契約先の ISP を変更する場合などに発生する。契約先の ISP を変更する場合には、一般的には、そのオブジェクト (ノードあるいはネットワーク) が使用する IP アドレスが変更になってしまい、それにともない、ネットワーク関連の設定を多数変更しなくてはならない。すなわち、本章で議論するプラグアンドプレイは、設定フリーの環境を提供する自動構成認識技術ではなく、設定 “変更” フリーの環境を提供するものを意味する。

3. Ingress 側での迅速な対応を実現するフレームワークの提供

Detination-Based Routing を適用した経路制御システムにおいては、送信元オブジェクトに近い地点での迅速な対処や制御が、一般的に難しい。とくに、DDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃への対処のための IP パケットフィルタリングなど、基本的には、現在は、Egress 側に近い地点 (すなわち受信オブジェクト側) で対処している。Ingress 側での迅速な対応が実現すれば、ネットワーク内に、本質的には不必要なトラフィックの流入を削減できるなどの効用も期待できるであろう。

4.3 提案アーキテクチャ; IRIDES

4.3.1 IRIDES アーキテクチャ

Destination-based Routing アーキテクチャにともなう不十分な転送パス制御とアドレスの集約化にともなう階層化が原因で発生する不十分なプラグアンドプレイ機能の 2 つの問題を解決するために、誘導経路情報の広告を用いた IRIDES (Invitation Routing Information aDvertisement for path Engineering

System) アーキテクチャの提案を行う。本アーキテクチャでは、通常のレイヤ3転送空間とは別に、トラフィックエンジニアリング可能なルーティング空間(誘導空間)を定義し、誘導空間と通常のレイヤ3転送空間の間には複数の誘導ポイント(IIR; Ingress IRIDES Router)ルータを設置する。なお、誘導空間は、物理的に独立したネットワーク空間でもよいし、通常のレイヤ2やレイヤ3の基盤上に構築される仮想的なオーバーレイネットワークのどちらでも構わない。すなわち、独立したネットワーク空間を持つ構造にするか、それともオーバーレイ型の仮想的な誘導空間を構築するかは、アーキテクチャの具体的な実装方法の選択肢である。

図4.1に、IRIDESシステムにおける通常のレイヤ3空間の概念図を示した。図では、2つのIIR(IIR1およびIIR2)が、インターネット上に分散配置されている。IIR1とIIR2は、まったく同一の経路情報をインターネットに対して広告する(エニキャスト[240])。送信元ノードから転送されたIPパケットは、経路制御プロトコル的に、より近いIIR(誘導ポイント)に転送(誘導)され、IIRを通して誘導空間に誘導転送される。

図4.2に、誘導空間(Traffic Engineering Plane)上に存在する宛先ホスト(DH1)に、3つの異なるホスト(SH1、SH2、SH3)からIPパケットが転送される場合を示した。送信側から送信された同一宛

1. IIR1 and IIR2 announce the same routing information, Net1
2. IP packet destined to Net1 is invited to the nearest IIR

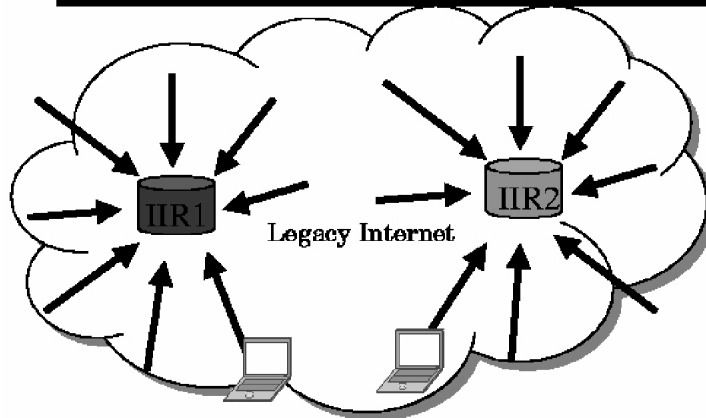


図 4.1. 通常のレイヤ空間での IRIDES の構成概念図

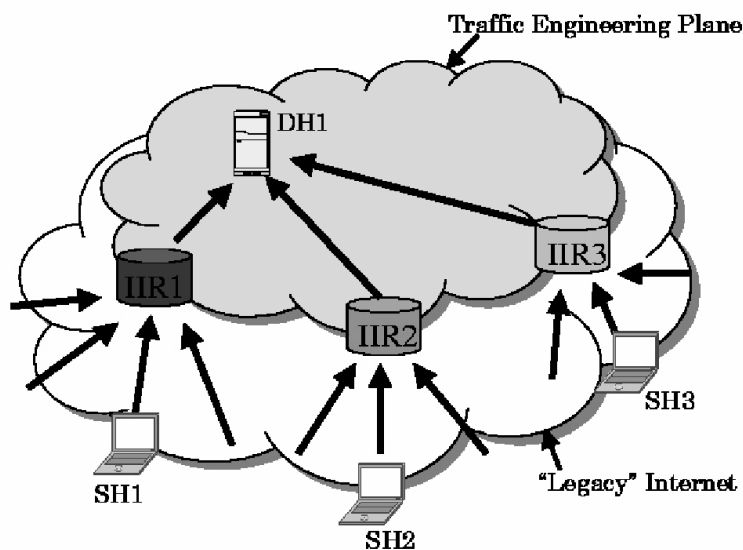


図 4.2. IRIDES における IP パケットの転送概念図

先 IP アドレスを持つ IP パケットは、経路制御的に、もっとも近接する誘導ポイント (IIR) に誘導される。IIR を通じて誘導空間に転送された IP パケットは、誘導空間で適用されている経路制御方式にしたがって、宛先ホスト (DH1) に転送される。IIR では、受信した IP パケット内の宛先 IP アドレス情報 (+ そのほかの IP パケットフロー識別子情報) から、誘導空間での経路制御で使用される IP パケットの転送のための識別子を選択し、適切なデータフォーマットに変換し、これを誘導空間に転送する。なお、誘導空間で使用される経路制御のための識別子としては、MPLS のラベルや VLAN タグ、IP トンネル用 IP アドレス、あるいは IPv6 アドレスなど、誘導空間ネットワークの運用者が、適切な識別子を自由に

選択可能とすることができる。

さらに、図 4.3 には、いったん誘導空間に転送された IP パケットが、EIR (Egress IRIDES Router) を経由して、再び、通常のレイヤ 3 空間上の宛先ネットワークに転送される場合を示した。宛先ネットワークが、トランジットを行わないスタブ型のネットワークであれば、誘導空間をバイパス経路として、誘導空間が接続するルーティングドメイン上で自由な転送パスを定義利用することを可能とすることができる。

図 4.4 に、IIR から EIR、あるいは宛先ホストに対して、複数の経路を提供する場合の構成例を示した。図 4.4 では、2 つの誘導ポイント (IIR) から、それぞれ、2 つの独立なデータ転送パスを提供しており、合計で 4 本の転送パスが提供されている。IIR にお

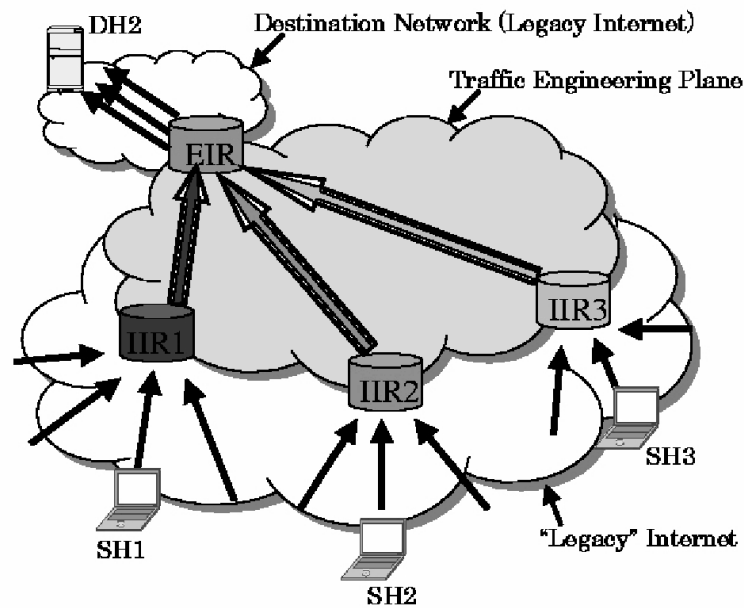


図 4.3. 誘導空間をバイパス経路とする構成例

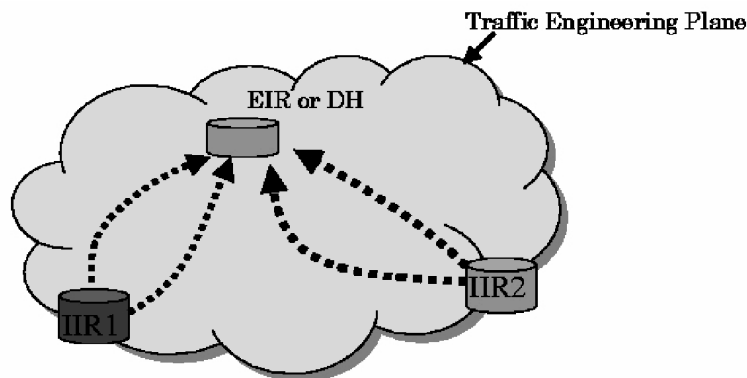


図 4.4. 誘導空間におけるマルチパスの提供

いては、どのようなポリシーで、2つのパスを利用するかの判断を、ローカル判断で行うことができる。

上述した IRIDES アーキテクチャは、以下に示したような技術的な特長を持つ。

1. エニキャスト技術を用いた誘導ポイント (IIR) の分散配置

(a) スケーラビリティ

IIR の負荷分散が、(拡張された) エニキャスト技術を用いた経路制御によって実現されるとともに、宛先オブジェクトへの転送パスを分散させることができる。IIR は、原理的には、グローバルインターネット上に分散配置することも可能である。

(b) 転送経路の最適化

送信元オブジェクトに最も近接する IIR を経由して IP パケットの転送を行うことができる。その結果、より適切な経路の利用を可能にすることができる。

(c) Ingress 側での制御の可能性

DDoS への対応、輻輳制御、あるいは、ポリシー制御を、IIR において実行することが可能となる。

2. 既存の IP インフラストラクチャとの共存

(a) エッジ部を既存の IP インフラストラクチャ、コア部をトラフィックエンジニアリング可能な誘導空間として構築することで、すべての既存ホストおよび既存ネットワークとの共存を可能にする。

(b) 誘導空間で使用する IP パケットのトランスポート技術は、特定の技術に固定されず、任意の転送方法を適用可能にすることができる。

(c) 図 4.2 および図 4.3 に示したように、既存の IP インフラと誘導空間をまたがったネットワーク上で、宛先オブジェクトからすべての送信元オブジェクトへのスパンニングツリーが形成される。このスパンニングツリーは、既存の経路制御システムで形成されるスパンニングツリーよりも、共有部分を小さくすることが可能となる。

(d) 誘導空間 (トラフィックエンジニアリングプレーン) での IP パケットの転送パスは、既存の経路制御をもとに計算される転送パスとは独立に定義することができるので、既存の経路制御システムとの共存が容易に実現可能である。

(e) 誘導空間におけるネットワークポロジの定義は、既存の IP インフラのものとは独立に定義可能であり、不均一なネットワーク基盤でも、同一の機能を持ったノードからなる均一な仮想ネットを定義することができる。現実のネットワークにおいては、仮に、単一ベンダで構成されたネットワークでも、ノードごとに、提供機能に関する不均一性が存在する場合が一般的である。

3. ポータブルアドレス環境の提供

エンドツーエンドでの IP パケット通信のための IP アドレスと、誘導空間におけるトラフィックエンジニアリングのためのアドレス (識別子) の分離により、エンドオブジェクト (ノードあるいはネットワーク) は、結果的に、ポータブルな IP アドレス空間を獲得することができるようになる。ポータブルアドレスの提供により、モバイルオブジェクトへの対応とプラグアンドプレイ環境 (設定変更フリーという意味での) の提供を可能とする。

IRIDES アーキテクチャでは、現在のインターネットシステムにおける、エンドノード (正確にはインタフェース) の識別を行うためのグローバルな識別子と、そこへの IP パケットの配送に必要な経路制御に必要な識別子を同一のものとし、この識別子のみを用いて転送パスの決定を行っているという、現在のインターネットの本質的な識別子管理と利用のアーキテクチャへの改善を提案している。すなわち、少なくとも、誘導空間においては、エンドノード識別子と転送経路決定のための識別子を分離することで、多様な、転送パスのエンジニアリングを可能としている。

4.3.2 IRIDES プロトコルアーキテクチャ

IRIDES システムのプロトコルアーキテクチャは、有線と無線の区別、および、Stable/Nomadic/Mobile/Adhoc の区別を行わず、プロトコルアーキテクチャとしては、個別の要素技術を選択/定義可能なメタ言語の構造に似たフレームワークのみの定義を行うアーキテクチャとして設計する。これにより、同一のプロトコルアーキテクチャ、およびこれを実現するソフトウェアアーキテクチャにおいて、個別技術を取替え可能な構造にすることを可能にする。

IRIDES システムでは、以下の 3 つのフレーム

ワークを提供する具体的なプロトコル設計を、今後、進める予定である。

- (1) 誘導空間(トラフィックエンジニアリングプレーン)におけるデータ転送方式/プロトコルを選択可能にする API (Applicaton Interface)。
- (2) EIR および IIR の間でのデータベース同期プロトコル。具体的に必要な作業は、iBGP における作業とほぼ同一であるので、iBGP ベースのプロトコルアーキテクチャが現実的であろう [15]。また、大規模化 (IIR や EIR の数の増大への対処) は、RR (Route Reflector) と同様の手法を導入することによって、必要となるデータ同期の量を、 $O(n^2)$ から $O(n)$ に削減させることが可能である。
- (3) ポリシ登録プロトコル。
IIR における制御ポリシは、送信元オブジェクトおよび受信オブジェクト、あるいはネットワーク運用者が指定/登録可能にすることが望ましい。ポリシの矛盾、設定に関する設定者の認証と権限の確認を行うプロトコルもあわせて必要になると考える。

4.3.3 問題点と今後の課題

IRIDES アーキテクチャの問題点と課題としては、以下の点が挙げられる。

問題点

- (1) ルーティンググループへの対処：
既存の経路制御プロトコルが決定する IP パケットの転送経路とは異なるパスを利用するので、本質的に、ルーティンググループの発生の可能性がある。この問題は、類似の機能とサービスを提供する MPLS において、既に、議論され、ループ検出のためのプロトコルの提案と標準化が完了している [233]。IRIDES システムにおいても、同様のループ検出プロトコルを定義する必要があるかは、実運用の形態などを鑑み決定されるべきであろう。
- (2) エンドエンドアーキテクチャ：
IIR および EIR においては、透明なレイヤ 3 以上の処理を行い、エンドエンドアーキテクチャの特長を喪失していないかの検討を行う必要がある。

- (3) 中継ノードでの処理：

IIR および EIR で必要となる機能は、現在のルータで行われているものとほぼ同程度のものであり、IP パケットの転送パフォーマンス上の問題は、発生しないと考えられる。

- (4) エンドエンド到達性の保障：

IIR および EIR では、アーキテクチャ上、NAT アーキテクチャと同様に、IP アドレスの変換も可能とすることができる。これによる、エンドエンドでの到達性の喪失の発生する可能性がある。プロトコルの設計とシステムの運用においては、この点に関する十分な考慮と検討が必要であると考えられる。

今後の課題

- (1) 宛先のアドレス解決と表現手法
誘導空間での EIR および宛先ホストへのデータ転送に必要な識別子 (= アドレス) の解決手法と、その表現手法の正規化、ならびに標準化を行う必要がある。
- (2) トラフィックエンジニアリングツールの汎用化
ルーティンググループの検出、転送経路の把握とエンジニアリングツールの確立など、現在のインターネットシステムでは確立していないツール群の汎用化と整備を行う必要がある。
- (3) 個別プロトコルの設計
上述した 3 つのプロトコルコンポーネントフレームワークの具体的な設計定義を行わなければならない。

4.4 IRIDES アーキテクチャの適用例

本節では、IRIDES アーキテクチャのアプリケーション (適用例) という観点から、いくつかの既存のアーキテクチャを考察する。本論文では、IRIDES アーキテクチャとして、エッジ部が既存インターネットシステムでコア部がトラフィックエンジニアリング可能なネットワークとしているが、実際には、これらは、基本的には双対の関係にすることが可能である。すなわち、上述のアーキテクチャとは逆の構成で、コア部が既存のインターネットシステムで、エッジ部が、新しいネットワーク (たとえば、IPv6 やプライベートネットワーク) とすることも可能である。

4.4.1 MIP と NEMO

文献 [86, 218] で提案されているマルチホームアーキテクチャでは、複数の HA (Home Agent) をインターネット上に分散配置し、複数の IP アドレスを持つ MH (Mobile Host) あるいは MR (Mobile Router) に対して、HA から複数のパケット転送パスを設定することで、マルチホーム環境を、MH および MR に接続された移動ネットワークに提供するものである。複数の HA は、すべて同一の経路情報をインターネットに広告し (誘導経路情報 = エニキャスト) することによって、インターネットからの誘導ポイント (IIR) へのアクセスを地理的に分散することができる。また、[320] で議論されているように、HA 間では、iBGP に似た HA-HA プロトコルを用いて HA が持つデータベースの同期が行われる。

4.4.2 SHAKE

SHAKE (SHARed multiple paths protocol for cluster network Environment) [337] は、Mobile IP を拡張して、複数の External への接続性を持つノードが、広帯域な Internal リンク (e.g., WiFi や Bluetooth) を利用しながら協力しあい、より、広帯域な External 通信を実現するアーキテクチャである。このアーキテクチャは、図 4.3 に示した構成と同一のものにとらえることができる。SHAKE では、HA が IIR (誘導ポイント) に対応する。

4.4.3 MPLS

MPLS のエッジルータが、IIR (誘導ポイント) と考えればよい。ただし、IIR は誘導経路情報の広告が行わず、通常のレイヤ 3 の転送経路上で、IIR (= MPLS エッジルータ) が、IP パケットを強制的にトラップして、誘導空間に導入するアーキテクチャであると解釈することができる。誘導空間における IP パケットフローの識別と転送経路の決定のための識別子は、データプレーンとコントロールプレーンに分かれていて、これらのマッピングが、各ルータでとられている。データプレーンでは、MPLS ラベルが、両方に共通の識別子となる。コントロールプレーンでは、IP パケットフローの識別は FEC (Forward Equivalent Class) で行われ、経路決定のための識別子は宛先の IP アドレスとなる。

4.4.4 NAT

エッジが Private アドレスを用いたネットワーク、コアがグローバル IP アドレスを用いたネットワークという構成である [73]。NAT ルータは、IIR にあたる。図 4.3 に示した EIR が存在する場合も、さまざまな技術を用いて実現することが可能である。一般的に、IIR (NAT ルータ) は、NAT セグメントに対しては、グローバルには重複のある (= 同一の) Default Route の情報を広告することになる。IIR では、IP アドレスの変換テーブルが生成される。誘導空間での IP パケットフローの識別子はグローバルな宛先ホストの IP アドレスか EIR (= NAT ルータ) の誘導空間側のグローバルな IP アドレスとなる。

4.4.5 6to4, ISATAP

6to4 [32] は、IPv4 のネットワーク上で、IPv6 のネットワークセグメントを相互接続しルーティングを行うアーキテクチャである。IPv6 のネットワークセグメントには、IPv6 のアドレスプレフィックスとともに、中継ルータの IPv4 アドレスが割り当てられる。IPv4 ネットがコア部 (誘導空間)、IPv6 ネットがエッジ部となり、6-to-4 ルータが IIR および EIR に対応することになる。誘導空間でのフローの識別子は宛先ホストの IPv6 のアドレス (プレフィックス) であり、経路制御決定のための識別子は 6-to-4 ルータ (= EIR) の IPv4 アドレスとなる。

ISATAP [107] は、IPv6 アドレスフォーマットの下部 32 ビット中に、IPv4 のアドレスを埋め込むアーキテクチャである。6-to-4 と同様に、IPv4 ネットがコア部 (誘導空間)、IPv6 ネットがエッジ部となる。誘導空間でのフローの識別子と経路制御決定のための識別子は、ともに、宛先ホストの (宛先 IPv6 アドレス中の) IPv4 のアドレス部分である。NAT や MPLS と同様に、IIR からの誘導経路の広告は行われない。

4.4.6 マルチキャスト

現在のインターネットは、ユニキャストサービスを基本としており、必ずしもマルチキャストサービスを本格的に提供はしていないし、ネットワーク内で使用されているルータにおけるマルチキャスト機能のサポートの状況は、同一ベンダが提供するルータですら、残念ながら、一様ではない状況である。また、現在最も広く利用されている PIM (Protocol

Independent Multicast) は、RPF (Reverse Path Forwarding) [89] のメカニズムを用いたマルチキャストパケットの転送を行っており、マルチキャストパケットの転送ツリーは、ユニキャストの転送経路から一意に決められてしまう。これら 2 つの問題を、IRIDES アーキテクチャを適用することで解決することができる可能性がある。PIM における RP (Rendezvous Point) を IIR とし、誘導空間のネットワークポロジを、マルチキャスト機能を持った適切なノードのみから構成されるネットワークにすることで、不均一機能をもつノードから構成されるネットワークにおいても、ユニキャストのパケット転送経路に独立なマルチキャストサービスが提供可能となる。

4.5 まとめ

現在の経路制御システムは、グローバルスケールでの、宛先アドレスをルートとしたスパンニングツリー型のパスをもとに IP パケットの転送を行っているために、必ずしも自由なパスの制御を実現することが容易ではない。本章では、ユニキャストの概念を拡張した誘導経路情報の広告を用いたインターネットパス制御アーキテクチャ (IRIDES; Invitation Routing Information advertisement for path Engineering System) の提案を行った。提案アーキテクチャは、既存の経路制御システムとの共存が可能であり、十分なスケーラビリティを持つ。さらに、提案アーキテクチャをもとに、いくつかの具体的なアプリケーション (e.g., マルチエージェント型マルチホーム NEMO/MIP) が実現されることを示した。

今後は、誘導空間における汎用的な宛先のアドレス解決と表現手法と、トラフィックエンジニアリングツールの汎用化、さらに、3 つのプロトコルコンポーネントの設計を行う予定である。

