

## 審査の結果の要旨

氏名 中川 郁夫

本論文は「プロトコル非依存な広域分散 IX のアーキテクチャに関する研究」と題して、9 章より構成されており、既存のインターネットエクスチェンジ (IX; Internet eXchange) システムが直面している技術的な課題を解決する次世代の IX アーキテクチャの提案と、提案アーキテクチャの実証実験網への展開のための研究開発、さらに、その検証ならびに評価を構築した実証実験網を用いて行い、提案アーキテクチャの実用性と有効性を示すことにより、商用のサービス展開を促進した。

インターネットエクスチェンジシステムは、インターネットの発展過程において登場したシステムであり、インターネットサービスプロバイダ (ISP; Internet Service Provider) の間での、相互接続の「場」を提供することを目的として構築設置されるシステムである。IX システムの導入により、ISP 間の相互接続はそれまでの個別のデータ回線を用いて実現されていた形態から、複数の ISP との相互接続に必要な通信回線を共用可能な一つのデータ回線に集約するとともに、相互接続に必要な境界ルータの数とそのインターフェースカードの数を大幅に減少させることに成功し、その結果、ISP 間の相互接続に必要なネットワーク機器とデータ回線の両方に関わる各 ISP が負担しなければならない費用コストの大幅な削減が実現された。しかしながら、各 ISP は、IX が存在する「場」に、データ回線とネットワーク機器を持ち込む必要があり、ネットワークの広帯域化に伴い、これらのコストは、少なからぬものとなってきていた。さらに、ネットワークの広帯域化は、従来の IX システムにおける、トラフィックの交換容量の共有に伴うスループットの低下が大きな運用上の課題となりつつあった。

本論文では、最初に IX の仕組みと技術的な課題についてまとめ、これらの IX の技術的な課題を解決する IX アーキテクチャとして、プロトコル非依存な広域分散 IX アーキテクチャを提案している。さらに、同アーキテクチャの実現手法の一つとして、MPLS (Multi-Protocol Label Switching) 技術を IX に応用した MPLS-IX アーキテクチャを提案し、その検証ならびに評価を行っている。本研究の新規性は以下の 4 つに集約される。(1) IX の研究として初めて、IX の定義の一般化および抽象化 (IX の実現技術の視点から物理要件と論理要件を、ISP が単一の物理ポートと物理回線の組で IX に接続するという物理要件と、IX は ISP 間に IP 層で隣接する論理的な通信路を提供するという論理要件で IX を抽象化することができた) を行うとともに IX システムにおける責任分解点と運用モデルの要件の整理、(2) ISP が任意のデータリンクプロトコルを用いて IX に接続することが可能であり、その意味でプロトコル非依存なシステムであり、かつ ISP 間に IX 上の仮想的な通信路を提供することにより、IX 内を IP ネットワークとして構成可能な広域分散環境で IX を実現することを可能とするプロトコル非依存な広域分散 IX アーキテクチャの提案、(3) プロトコル非依存な広域分散 IX アーキテクチャの実現手法の一つとして、MPLS 技術を IX に応用した MPLS-IX アーキテクチャの提案 (インタードメインでの LSP の確立や TTL 処理など MPLS に関するプロトコル拡張を行った)、(4) MPLS-IX に関する機能検証を多数のルータメーカおよび ISP が参加して構築した広域 MPLS-IX のテストベッドを用いて、長期間に渡る運用実験を通してその実用性の検証と評価、の 4 点である。MPLS は仮想的な通信路である LSP (Label Switched Path) を提供する。LSP はデータリンクプロトコルに非依存な環境で利用可能あり、抽象度の高い論理的な通信路とみなすことができる。MPLS-IX では、IX に接続する ISP 間に LSP を確立し、その上で ISP 間の相互接続を行う。これによって、MPLS-IX アーキテクチャは、(a) データリンク層に非依存な相互接続環境の実現、(b) 広域分散環境の IX 機能の提供、(c) 既存の IX を階層構造に相互接続する「階層型 IX」の実現の 3 つの具体的な特徴を持つ。

第1章は、序論である。ここでは、インターネットの発展過程において、なぜ、IXシステムが必要になった背景を概観し、現在のIXシステムが抱えている技術的な課題を提示し、本研究の目的が述べられ、最後に、本論文の構成を示し、各章の概略を説明している。

第2章では、IXシステムの構造と導入に至った背景、さらに、IXシステムを実現するための要素技術、運用技術に関する整理を行い、その結果から、IXの定義の一般化と抽象化を行っている。これまで、IXに関する定義はGoeff HustonによるISPの相互接続モデルによる分類が一般的であった。これはISPの経路制御と運用という視点からの定義であり、IXの構築技術という面では応用が難しかった。本研究におけるIXの定義では、IXの実現技術の視点から要件条件を整理しており、物理要件と論理要件でIXを定義している。これは、IXアーキテクチャ、特にIXの構築技術に関する研究の礎となるものである。

第3章では、従来の次世代IXシステムに関する研究開発プロジェクトの概観を行い、それぞれの研究開発の狙い、位置付け、実用化の状況、および、本研究との相違点を明確化している。

第4章では、プロトコル非依存な広域分散IXアーキテクチャを提案している。ここでは、上記のIXの定義に基づいて物理要件と論理要件を明確に分離することにより、既存のIXでは解決できなかった新しい方法を適用してIXアーキテクチャを提案した。

第5章では、第4章で提案したプロトコル非依存な広域分散IXの実現手法の一つとして、MPLSをIXに応用したMPLS-IXを提案し、その検証と評価を行っている。さらに、実トラフィックを収容したテストベッド上での実証実験により、安定性・実用性を示し、実用化を前提にした検証と評価を行い、本研究の妥当性と実用性、および応用性を確認し、産業界への展開を容易にした。

第6章では、本研究で提案しているMPLS-IXアーキテクチャを適用した広域実証実験網を用いた、実践的アプリケーションの展開と、これらのアプリケーション自身またアプリケーションの動作を用いた提案システムの検証評価を、実サービス運用という視点で行った。

第7章では、本研究で提案しているMPLS-IXアーキテクチャを適用した商用サービスとしての実用例を示している。サービス事例は、単独のサービスプロバイダによるサービスのみではなく、既存のIXを介したサービス提供を含んでおり、本提案アーキテクチャの高い汎用性を示している。

第8章では、提案アーキテクチャの実証実験網および商用ネットワークでの運用を通じたアーキテクチャ上ならびに運用上での問題と課題の議論を行い、本研究に関連する領域における今後の研究の方向性を示している。

最後に、第9章では、本研究に関するまとめと考察を行い、今後の課題を明確化した。

本研究の研究成果は、産学協同で構築運用されている実証実験網(MPLS-IX 実証実験網)を用いた検証・評価と、その実用性の検証を行い、その結果、国内通信事業者による商用化あるいは商用ベースのIXでの応用などに結びついた。

以上のように、本論文は、IX(インターネットエクスチェンジ)に関する研究として初めてIXの定義の一般化および抽象化を行うとともに、ISPが任意のデータリンクプロトコルを用いてIXに接続することを可能とするプロトコル非依存でかつISP間にIX上の仮想的な通信路を提供することが可能な広域分散IXアーキテクチャの提案を行い、さらに本提案アーキテクチャを適用したMPLS-IXアーキテクチャの提案、ならびに広域実証実験テストベッドの構築と運用を通じた性能ならびに機能評価、さらに商用運用という視点での実用性の検証と評価を行うことにより、本提案アーキテクチャの商用展開の基礎確立することに成功しており、インターネットコミュニティおよび情報理工学の発展に対する貢献は少なくない。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。