

第VII部

衛星通信によるネットワーク構築 実験

第7部 衛星通信によるネットワーク構築実験

第1章 衛星回線に適合した経路制御技術

1.1 概要

インターネットが発展すると共に、インターネット上で利用されるアプリケーションは、伝送帯域や伝送品質の保証、あるいは実時間性をネットワークに要求するようになっている。

これらの要求に応えるためには、各通信媒体の特性を活かしたアプローチが有効である。衛星回線は広域性、同報性、回線設定の柔軟性、耐障害性など従来の地上回線にはない様々な特性を持っており、インターネットでの利用が広く研究されている通信媒体である。また、片方向通信路として利用する手法も非常に有効である。

本年度 WISH では、衛星回線を有効活用する上で問題を解決するためにいくつかの機構を設計・実装した。

1.2 インターネットを用いた衛星通信回路制御機構の構築

本研究では、衛星通信回線を、動的に必要な帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際に発生する問題の解決を行った。

衛星通信回路は、限られた帯域を複数に分割して、各地球局に割り当てて通信を行う。通常は帯域幅を固定して通信を行うため、しばしば実際のトラフィック状態と割り当て帯域に不釣り合いが生じ、ネットワーク全体の利用効率低下を招いている。利用効率を向上させるためには、必要に応じて帯域の再配分をする必要がある。

また、動的に帯域を割り当てるには、広域に分散する地球局を遠隔操作するための機構が必要となる。帯域再配分作業の障害となっている原因に、各地球局の制御についての問題がある。衛星通信回線の設定変更を行うためには、自局・相手局双方の無線設備の設定を一致させる必要がある。しかし、自動的

に回線の設定を行う機能を有するものは、複雑で高価である上、音声通信向けに設計されているものである。そのため、AI³ Project ではこのような設備は利用せず、オペレータにより手動で運営を行っているが、手動運用でリアルタイムに制御を行うことは管理コストが非常に大きく、非現実的である。現在の安価な設備を改変することなく、地球局相互の制御が可能となれば、大きな設備コスト・人的コストの削減につながる。

以上に述べた問題のため、衛星通信回線を、動的に必要な帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際に発生する問題の解決を行った。インターネットを用いて、分散する地球局を遠隔操作する機構、回線の利用率に応じて動的に帯域を再配置する機構を設計し実装した。

本研究により、衛星通信回線の管理コスト削減と、衛星通信回線をインターネット上の通信路として利用した場合の帯域利用効率向上が実現される。そして、インターネットのような動的に必要な帯域が変化する通信路における、衛星回線の利用促進への貢献が期待できる。また、衛星通信回線を、動的に必要な帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際の回線利用効率の向上と、地球局の管理コストの削減が可能となる。

1.2.1 解決手法

地球局の遠隔制御を実現するには、下記のような機構が必要となる。

- 信頼できる制御命令伝達機構
各地球局の設備をインターネットに接続し、IPを用いてデータ転送を行う。
- 無線設備を制御する機構
無線設備（モデム）はIPで送信されてくる制御命令をそのまま実行することはできない。IPで送られてきた制御命令を地球局内に設置したIPを扱える機器（PC）で受信してモデムの制御コマンドに変換し、シリアルインターフェースを通してモデムに送信するソフトウェアを搭載する。

- 制御結果を確認する機構

結果の確認は、電波の状態とインターネットの接続状態の2項目について行う必要がある。電波の状態を観測するためには、スペクトラムアナライザを用いる。無線局内にPCと接続されたスペクトラムアナライザを設置し、実際に送出している電波の周波数、電力、帯域幅の情報を観測する。このPCから、観測データを取得する。

- 制御に失敗した場合の復旧機構

何らかの理由により、チャンネルの制御に失敗した場合は、衛星通信回線が通信不能となる。本手法は地球局の無人制御を目標としているので、制御に失敗した場合に自動的に復旧させる機構が必要となる。

また、トラフィック量に応じた帯域の割り当てを実現するためには、各地球局でトラフィック量を測定してデータを衛星回線経由でIPの形で帯域配分計算機構に転送し、最適な帯域配分の決定をする、といった処理が必要となる。

1.2.2 設計

本機構は、トラフィック測定モジュール、帯域配分モジュール、モデム制御モジュール、遠隔操作モジュール、電波状態取得モジュールの5つから成る。

トラフィック測定モジュールは、各地球局(ハブ局も含む。以下同じ)に設置されているルータPCに組み込まれ、単位時間当たりのチャンネルのトラフィックを計測する。そして、測定結果をインターネットを使用して、ハブ局の帯域配分モジュールに通知する。

帯域配分モジュールは、ハブ局に設置される制御PC上で動作し、あらかじめ指定された単位時間ごとに、トラフィック量の集計と帯域割り当ての再配置を行う。各トラフィック測定モジュールから各チャンネルのトラフィックの通知を受け、チャンネルごとに集計し、最適な帯域配分を計算し、結果に基づいて帯域を比例配分する。そして、結果を後述する同一PC内の遠隔操作モジュールに引き渡し、各地球局に通知する。また、通信路に異常が発生した場合、復旧までの間は当該通信路の両端のルータ設定が変更されないよう固定する。

モデム制御モジュールは、PCからモデムを制御する機能を有し、各地球局内のモデム制御PCに組み込まれる。モデムの制御ポートに制御PCを接続

し、遠隔操作モジュールからモデム設定変更の命令を受け、制御する。

遠隔操作モジュールは、ハブ局の帯域配分モジュールが決定したチャンネルの設定情報を、各地球局のモデム制御モジュールへ伝達する。帯域配分モジュールと接続している本モジュールは、帯域配分モジュールから帯域配分通知メッセージを受け取ると、前回のメッセージと比較し、設定の変更が生じたチャンネルを選び出し、そのチャンネルの両端のモデム制御モジュールと接続している本モジュールに対し、設定の変更情報を送信する。

また、後述の電波状態取得モジュールに対して、電波状態の問い合わせを行い、意図したとおりの電波が各地球局から送出されていることを確認する。

電波状態取得モジュールは、PCからスペクトラムアナライザを制御する機能を有し、ハブ局内に設置されるPCに組み込まれる。GPIBインタフェースカードを持ったPCと、スペクトラムアナライザのGPIBポートを接続し、データの交換を行う。

PCはインターネットに接続されており、同じハブ局内の遠隔操作モジュールから、電波状態の問い合わせを受信する。そして、GPIBポートを通してスペクトラムアナライザからデータを取得し、遠隔操作モジュールに通知する。

1.2.3 実装と評価

スター型、Point to Multipoint型トポロジの環境で実装、評価した。

スター型のネットワーク環境と実際のネットワークとの相違点は、衛星利用の有無である。この実験環境では衛星通信回線を用いず、ハブ局のモデムと他の地球局のモデムを同軸ケーブルで直結した。

また、無障害時の動作の評価として、以下の場合の動作を検証した。

- 制限無し帯域配分

モデムの状態、および、IPの通信状態から、チャンネル両端のモデムの設定が一致していることが確認できた。また、帯域配分に制限をかけていないため、一部の帯域が、ほとんどなくなったことが確認できたが、その帯域が0となることはなかった。これは、TCPのACKパケットの影響と考えられる。

- 最低帯域保証つき帯域配分

今回は、帯域配分に制限を設けないときにはほ

とどなくなっていた帯域が、最低 1 MHz の最低保証帯域を設定したためにそれ以下になることはなかった。

また、障害発生時の動作の評価として、Keep Alive 断絶時の動作、設定変更に失敗した場合の動作が正しく動作することを検証し、確認された。

よって実験を通して、この機構が正しく動作することが確認された。

1.3 広域ネットワークにおけるトラフィック特性を考慮した経路選択機構

既存の経路制御機構では、ネットワーク管理者やユーザがネットワークの特性を考慮してトラフィック毎に適切な経路を選択することはできず、アプリケーションが利用する回線を自由に選択する機構は存在しない。現在のインターネットでは、パケットが通過する 2 地点間の経路は経路制御プロトコルに基づく経路制御機構により決定されており、経路制御プロトコルにより決定される一つの経路しか利用されない。

また、インターネット上にはバックアップのためだけに存在するネットワークなど冗長なネットワークが数多くあるが、定常的に使用されているネットワークではトラフィックが増えて帯域を圧迫していて、現在のインターネットでは回線の利用が効率的でない。

本研究では、様々なネットワークの特性を考慮し、アプリケーションからの要求やネットワーク管理者の要求をより柔軟にパケット転送に反映させるための機構を提案した。これに基づき、複数の経路を持つ 2 つのルータ間で、自由度の高い統合的なパケット転送を実現する経路選択機構を設計し、実装した。

このことを実現するため、広域なネットワークにおいてトラフィック毎に通過する経路を選択できる統合的な経路選択機構を設計して構築し、評価を行った。

1.3.1 経路制御の問題点

トポロジが複雑になったネットワークの AS (Autonomous System) 内の経路制御には、RIP[92] や OSPF[104]、IS-IS[25] などの IGP (Interior Gateway Protocol) が用いられているが、既存の動的経路制御では、宛先までのホップ数や、回線のスループットに基づいた方法でしか経路を選択することができない。

ネットワーク資源である帯域の利用率を最適な状態に維持し、ネットワークの転送能力を向上させることという点においては、経路制御プロトコルによって生成される経路表を用いた既存の経路制御機構は充分ではない。そのため、Traffic Engineering が必要である。

Traffic Engineering を実現することにより、ネットワーク管理者は、定義されたドメイン内においてトラフィックのフローを管理でき、回線のトラフィック量を制御することができる。

そして現在 Traffic Engineering を実現している技術の一つとして、MPLS (Multi Protocol Label Switching) がある [10]。

MPLS では、ラベルを用いて経路の選択を行うことにより、ルータで経路制御の処理にかかるオーバーヘッドを削減し、高速な経路制御が実現できる。

MPLS ドメインのエッジルータ間でパスを確立させ、明示的なルーティングが可能となる。エッジルータ間のパスは、RSVP-extension[22, 127] を使用して LSP を確立し、トンネルとして利用する。

しかし、ラベルスイッチを使用する LSP を設定するために以下の方法を用いると問題点が生じる。

フロー・ドリブン方式を使用すると、LSP が生成される前に流れるパケットは、ホップバイホップ転送され、フローの数が増えるとラベルが急増する。また、トポロジ・ドリブン方式を使用すると経路エントリの数だけラベルが必要となり、フロー毎の制御ができない。

結果として現状では、トラフィック制御に対するネットワーク資源の最適化はされていない。このため、効率的な回線の利用が難しい。IGP を用いても自律的にネットワーク全体のパフォーマンスを向上させることは、現状では不可能である。

つまり、現時点では、エンドユーザが適切な QoS を享受することは難しいと言える。

1.3.2 提案・設計

本研究で実現する経路制御では、トラフィックが最短経路のパスを通ることには拘らない。最短経路を通ることよりも、ユーザからの要求や回線の特性、状態を考慮することを重視する。

それぞれの回線によっては持つ特徴が異なる。本機構では、ネットワーク遅延のような回線の特性を考慮し、輻輳状態、帯域容量といった回線の状態に

見合った経路をアプリケーションが選択できるようにする。これにより、ネットワーク管理者およびエンドユーザにとっての QoS の実現が可能となる。

本機構では、あらゆるネットワーク環境で使用できることを目標とするが、前提とするネットワークでは、2つのルータ間に複数の経路が存在し、ネットワーク特性の異なる回線である、ということが必要条件として挙げられる。

また、経路の選択を要求する者として、ネットワーク管理者とエンドユーザを想定する。ネットワーク管理者とは、トラフィックの振り分けを行うルータの管理者を指す。エンドユーザは、2地点間での経路選択を要求するユーザのことである。このネットワーク管理者とエンドユーザの双方を合わせて、client と呼ぶ。client が、経路選択機構に経路選択のポリシーを申請することができる。

- エンドユーザからの利用

経路選択を行う2地点を通るトラフィックを経路選択の対象として、本機構にポリシーを申請できる。

- ネットワーク管理者からの利用

管理しているネットワークに流れるトラフィックの状態を常に把握し、任意に経路選択のポリシーを決定して冗長的な部分の回線を利用することにより、トラフィックの流れを支配して前述の問題を防ぐことが可能となる。

また、多数のユーザから要求された複数の条件が衝突した時には、誰かが衝突を回避するための制御を行わなければならない。複数のユーザに対して優先度を付ける場合も、申請された要求全体を把握して判断する者が必要である。このため、あらゆるトラフィックの経路選択に関して最終的な決定権を持つ者が存在しなければならない。この権利を経路選択を行うネットワーク管理者に割り当てる。経路選択を行うルータの管理者は、この権利を他に委譲することも可能である。

本機構は、既存の経路制御機構の上に成り立つ。ポリシーによる経路選択を行わない場合は、従来の経路制御機構によってパケット転送を行う。

適切な経路選択を行うネットワーク上で、経路選択を行うルータを route selector、route selector からのパスの宛先となるルータを end point と呼ぶ。また、エンドユーザからの要求を受け付け、route

selector に経路選択のポリシーを注入するサーバを、policy server と呼ぶ。

経路選択機構は、これら3つの機能を持つルータおよびサーバから構成される。

対象となるパケットを指定し選択先の経路を明示する、client から与えられる経路選択を行うための条件を、ここでは「ポリシー」と定義する。

扱うポリシーには、パケットの送信元 IP アドレス、パケットの宛先 IP アドレス、宛先ポート番号、RFC1700[123] で定義されたプロトコル、ロードバランス、の5つがあり、これらの値をユーザが policy server に申請できる。

ここではロードバランスを、隣接する2地点間のルータで複数の回線が存在する時、それぞれの回線の帯域容量に対するトラフィック量を監視し、複数の回線でトラフィック量のバランスを保ち回線状態を維持することと定義する。

また、アプリケーションからの要求やネットワークからの状態の報告について、本機構がいつでもこれらの要求を全て満たしてパケットの転送処理をできるとは限らない。よって、policy server では、経路選択を行う際にトリガーとなるポリシーに対して、優先度の順位づけを行う。

また、本機構では、ポリシーそのものを追加することができる拡張性を持たせる。

そして既存のルータへの取り組みとして、変更が必要なルータは route selector と end point の2つだけであり、2地点の間に存在するルータなど他のルータは、機能を変更する必要がない。

よって、route selector と end point の2つルータをネットワーク上の任意の2地点に導入することにより、2つのルータ間は tunnel によって接続するため、2地点間のネットワークの規模、形態に関係なく、経路の選択が実現できる。

route selector と end point を多数設置することにより、広域のネットワークに対応したより汎用的な経路選択機構の構築が可能となる。この例を図 1.1 に例を示す。

点線は各サーバ・ルータ間のポリシーに関する情報交換を、実線はコネクションを表す。

また、本機構は、片方向通信路 (UDL: Uni-Directional Link) を含むネットワーク上でも利用できる。UDL の代表的な例として、衛星回線が挙げられる。衛星回線の UDL を含むネットワークは、

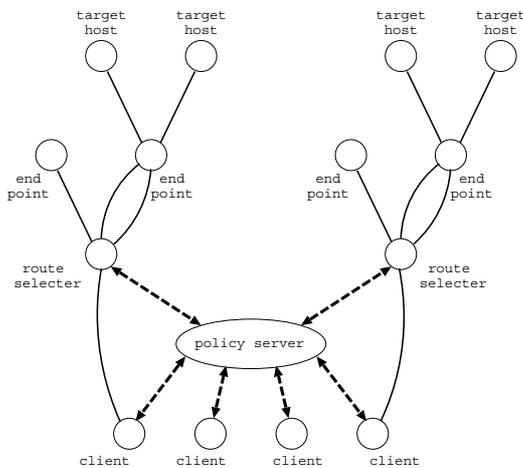


図 1.1. 多数のルータによる経路選択機構の構築

マルチキャストとの親和性が高い。衛星回線の受信専用局を多数設置することにより、マルチキャストの receiver は増加する。この点に着目し、経路選択機構がマルチキャストにも適応できるようにする。

図 1.2 に、UDL を含むネットワークでマルチキャストを使用する時のトポロジの例を示す。

図 1.2 に示すように、ユニキャストルータ、マルチキャストルータを配置する。マルチキャストのネットワークを構成する主要な要素として、衛星回線の UDL バックボーンを想定する。

また、単純に特定の 2 地点のルータの間での経路選択にとどまらず、本機構を用いた将来的な利用モデルとして、企業や大学などが地理的・ネットワークトポロジ的に離れた 2 地点間を結ぶ VPN (Virtual Private Network) などでの利用が挙げられる。

本機構を VPN で利用する例を図 1.3 に示す。

ここでは、それぞれの地区の R が route selector、

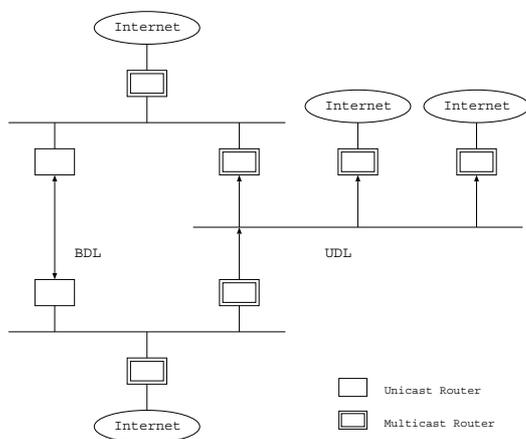


図 1.2. 本機構上でのマルチキャストの利用

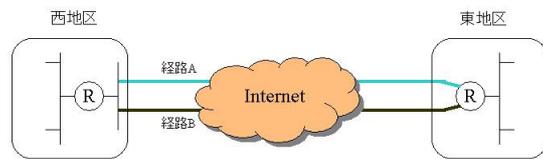


図 1.3. VPN での使用例

end point となる。R には 2 地点を接続する複数の経路が收容される。

本機構を導入することによって、2 つの経路 A、B の間での経路選択が可能となる。

1.3.3 設計

経路選択機構は、3 つの主要なサーバおよびルータから構成される。以下の基本方針に基づいて設計する。

- ネットワークトポロジの前提
本機構は、上に述べたネットワークトポロジを前提とする。
- 優先度の順位付け
複数のポリシーを、同時にパケット転送に反映できない場合が考えられる。ポリシーに対して優先度を決定できるようにし、優先度に応じてパケット転送を行うよう設計する。
- ネットワークに対する最小限の変更
route selector、end point となるルータにのみ変更を行う。
- 機構の拡張性
ネットワーク上の全てのルータが route selector と end point の双方の機能を持てば、エンドユーザは任意の 2 地点間で経路を選択することが可能となる。将来的には、多数の route selector と end point で本機構が構築されてゆくことを想定する。

また、経路選択機構を担う大きな機能を policy server、route selector、end point の 3 つに分割する。それぞれは独立したルータおよびサーバであり、互いに協調して経路選択を実現する。

これらのルータ、サーバは経路選択機構全体では以下のような流れで動く。

1. client が、経路選択のポリシーを policy server に申請する
2. policy server が route selector に経路選択のポリシーを反映する

表 1.1. 条件が衝突した場合に優先される client

client 1	client 2	優先される client
ネットワーク管理者	エンドユーザ	ネットワーク管理者
エンドユーザ	エンドユーザ	先にポリシーを申請した client

3. policy server と end point が協調して tunnel を確立させる

4. route selector で経路選択を実行する

policy server では、client が申請する経路選択のためのポリシーと選択先の経路を、受け付ける。選択先の経路には、tunnel の end point のルータを指定する。policy server は、route selector となるルータ、end point となり得るルータのリストを保持する。

そして policy server は、申請されたポリシーと選択先の経路が、正当なものかどうかを審査し、結果が問題なければ route selector にポリシーと選択先の経路を注入する。

次に、route selector は、policy server からポリシーと選択先経路を受け入れ、その選択先経路に従い、end point との間に tunnel を確立する。経路選択の対象となるパケットは、tunnel に転送する。

route selector では経路表を検索した後に、経路選択の処理に移行する。

最後に、end point となるルータには、経路選択の対象となるパケットの宛先ノードへの適切な経路が経路表に存在している必要がある。

また、route selector からの要求により、route selector との間に tunnel を確立させる。

ここで、複数の client からそれぞれポリシーが申請された時、ポリシーの条件が衝突する可能性がある。ポリシーの条件が衝突した場合に優先される処理を、表 1.1 にまとめる。

また、経路選択を必要としない時、本機構によって他の経路制御プロトコルの動作に影響を与えてはならない。本機構は、経路選択を必要としない時、パケットに対して一切の処理を行わない。

1.3.4 評価

本研究で提案した機構が、実際のインターネットの上で有効であることを検証する。実際に2地点間で性質の異なる複数の回線を持つ広域なネットワークとして、AI³ Network 上に、本研究で実装した機構を組み込み、評価を行った。

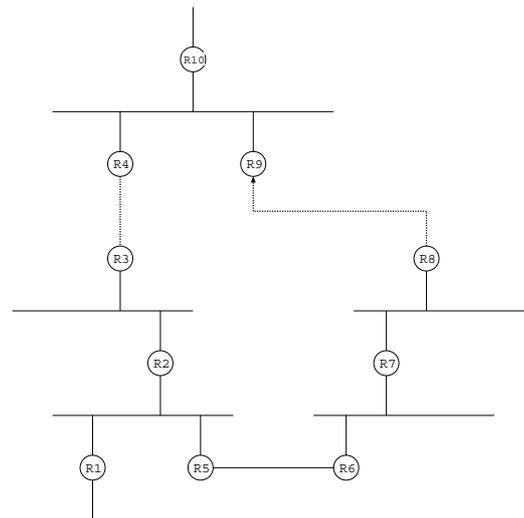


図 1.4. 評価に関する AI³ Network のトポロジ図

本研究の評価を行うため、AI³ Network の再構築を行った。評価に関わる部分のネットワークトポロジを、図 1.4 に示す。route selector、end point となるルータを新たに導入した。また、UDL のネットワークを追加した。

ポリシーによる適切な経路選択が実現できた。広域ネットワークで本機構が十分に実用に耐え得ることが証明された。

1.4 片方向リンクを含むネットワークにおける動的経路制御機構

本研究では、インターネットで最も広く利用されている経路制御プロトコルである OSPF の機能を拡張し、片方向通信路を含むネットワークに対応した経路制御プロトコルを設計した。この拡張機能は既存の OSPF プロトコルと互換性を持つため、片方向通信路に直接接続するルータに本設計を適用するだけで、ネットワーク全体の OSPF ルータが最適な経路表を作成できる。また、衛星回線など大規模なノードが接続するリンクに対応する規模性を持つ。更に、AS 内において片方向通信路だけで接続されたネットワークが存在するトポロジに対応する。

本研究で設計した新しい OSPF 機構により、片方向通信路を含むあらゆるネットワークトポロジにお

いて動的な経路制御が実現される。これにより、従来のネットワークにあらゆる形態の衛星回線を追加し利用できる。また、片方向通信路としての利用が考えられる通信媒体は、衛星回線にとどまらない。例えば、地上波は衛星回線と近い性質を持つ通信媒体であり、本研究の成果は他の片方向通信路を用いたネットワークにも適用できる。

1.4.1 問題点

衛星回線は、片方向通信路として利用する手法が非常に有効であるが、片方向通信路をインターネットで用いる場合には幾つかの問題が生じる。特に、既存の経路制御プロトコルが片方向通信路を含むネットワーク上で正しく動作しないため、大規模なネットワークで片方向通信路を利用するのが難しい。この問題を解決するため、トンネリングを用いて片方向通信路上に仮想的なブロードキャストリンクを構築する手法が考案されているが、この手法ではトポロジによって経路が不安定になるなど、問題の完全な解決には至っていない。

まず、リンクの状態の検知という問題がある。OSPF では Hello プロトコルを用いるが、UDL 上では Hello メッセージが片方向にしか流れないため、送受信能力を持つノード（以下、RCF とする）同士以外の組合せではお互いに接続性があると認識しない。そのため、Hello プロトコルは UDL 上で動作しない。また、LSDB の同期に用いる OSPF メッセージは、データリンク層の機能によって宛先ルータに到達することが前提になっている。UDL には片方向にしかデータを送信する能力がないため、LSDB の同期ができない。

次に、OSPF では隣接ルータ同士が LSDB を同期させるため、大規模性という問題がある。この機構を衛星回線に適用した場合、多数のノード間で同一の LSDB を保持する必要があり規模性に欠ける。OSPF では、複数のノードが接続するマルチアクセスネットワークにおいて DR (Designated Router) を選出し DR を中心に同期作業を行う機能があるが、DR の機能は Ethernet など数台から十数台のネットワークを想定している。LSDB の同期にかかる時間は、OSPF ネットワーク全体の経路収束時間に大きく影響するため、大規模な UDL を含む場合も短い時間で LSDB を同期させる手法が必要である。

また、AS に UDL だけで接続するネットワークに

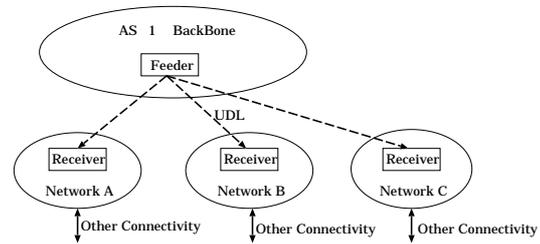


図 1.5. AS に片方向にだけ接続するネットワーク

に対する問題がある。衛星回線は通常のネットワークと異なり、地理的に広い範囲を同一のリンクで接続する通信媒体である。このため、衛星回線を用いた場合ある AS に片方向にだけ接続するネットワークが存在する可能性がある。これを図 1.5 に示す。

そして、エリア間経路制御・エリア分割で生じる問題がある。UDLR を用いて OSPF を動作させた場合、UDL 上のルータがあるエリアに UDL だけで接続していると経路が不安定になる問題がある。エリア内部の経路は必ずエリア外部の経路よりも優先されるため、あるエリアに UDL だけで接続された受信のみ可能なノード（以下、Receiver とする）はそのエリア内部へパケットを送信する場合に UDL を用いてしまう。このため、Receiver がエリア内の LSDB を保持している期間はエリア内部へ到達性がなくなり、エリア内の LSDB を失うとエリア内部への到達できる。このように route flap が生じる。エリア分割が生じた場合に分割された区分をまたいで UDL が動作していた場合にも、同様の現象が生じる。本設計ではエリア分割時も安定して動作する機構を構築する。

また、衛星回線は地理的に遠く離れたネットワークを接続するために用いる場合が多いため、衛星回線で接続されたネットワークを一つのエリアとして独立させるのが望ましい場合が多いと考えられる。

このような理由から、本機構では Feeder や Receiver が ABR として動作する場合を考慮し、UDL を用いたエリア間の経路制御をサポートする。

1.4.2 設計

OSPF に拡張機能を加えるにあたり、次の基本方針に従う。

- 全てのルータに加える変更は最小限に留める
- 可能であれば、特定のルータだけに変更を加える
- 既存の OSPF の安定性 [16] を失わない
- 既存の OSPF の規模性 [131] を失わない

UDL に直接接続する OSPF ルータだけに拡張と変更を加え、既存の OSPF ネットワークにおいて円滑に利用できる経路制御機構を設計する。

設計はエリア内の経路制御、エリア間の経路制御、AS 外部経路の経路制御の 3 つに大別される。

ここでエリアを定義する。本設計では OSPF は、“あるエリア内の全てのルータは、エリア内部において双方向の通信路を用いた経路により互いに接続性がある”と定義する。

また、エリア内の経路制御にあたって次の問題を解決する必要がある。

1. UDL の状態をどのように検知するか
2. UDL に大規模なノードが接続する場合、どのように LSDB を同期させるか
3. UDL を含むネットワークの経路を全ルータに正確に計算させるにはどうすればよいか

本研究では、“UDL の状態をどのように検知するか”という問題を UDL に特化した OSPF の Hello プロトコルを定義し解決する。これを UDL Hello と呼ぶ。UDL Hello では、UDL を用いて送信ノードから受信ノードへ一定時間ごとに Hello パケットを送信し、無事 Hello が受信されたことを受信ノードから送信ノードへ他の経路を用いたユニキャストによって通知する。UDL Hello は、Hello メッセージでノードのタイプ (RCF、SOF、Receiver) を広告する、UDL 上で直接 Hello パケットをやりとりできないノード間では Return Address 宛にユニキャストで Hello を送信する、という点で通常の Hello と異なる。ここで、送信のみ可能なノードを以下では SOF とする。

また、次の手法により“UDL に大規模なノードが接続する場合どのように LSDB を同期させるか”という問題と、“UDL を含むネットワークの経路を全ルータに正確に計算させるにはどうすればよいか”という問題を解決する。

まず、UDL Hello を用いて RCF の中から DR と BDR を選出し、マルチアクセスネットワークと同様、RCF は DR と BDR を中心に LSDB を同期させる。Receiver や SOF は UDL 上で LSDB の同期を行わない。次に、Router LSA において UDL を“通過できるマルチアクセスネットワーク”として広告する。受信のみ可能なノードは、“通過できるマルチアクセスネットワークへのリンク”をコストを最大に設定する。

しかし、この手法では送信能力だけを持つノードから受信能力を持つノードへの接続性を広告していない。その理由は、送受信可能なノードから選出された DR が SOF のルータ ID を Network LSA の Attached Router フィールドに含めた場合、送受信可能なノードから送信のみ可能なノードへ到達性があると計算されてしまうからである。そこで、可能なノードが存在するトポロジでは、可能なノードは自分自身を DR に選出し、自分から到達性がある隣接ノードを含む Network LSA を作成する。また、UDL を一つの Network LSA で表現した場合、RCF と SOF が接続するトポロジでは RCF から SOF へ到達性があると計算されてしまう。

そこで、本設計では RCF の中から DR を選出し、RCF 群から到達可能なノードを Network LSA によって広告する。また、SOF は他の DR の存在とは関係なく自らを DR に選出し自分自身から到達可能なノードを個別の Network LSA で広告する。SOF が複数存在する場合、SOF の数分の Network LSA が作成される。

エリア内の経路制御は、UDL 上のノードにおいて独自の LSDB の同期手法と LSA の作成方法を定義し、UDL を含むネットワークにおいて既存の OSPF ルータが正確にエリア内の Shortest Path Tree を計算できる環境を実現する。

本研究では、“あるエリア内の全てのルータは、エリア内部において双方向の通信路を用いた経路により互いに接続性がある”と定義しているため、トポロジの一部のエリアが分割されたら UDL における Receiver の接続性をエリア内の経路として計算してはならない。

このようなトポロジの変化は、UDL Hello の到達性だけでは検知できない。Receiver から RCF や SOF への UDL Hello はエリア外の経路によって受信される可能性がある。その場合、UDL は使用できる状態だと判断される。この時、分割されたエリアの Receiver やルータは Shortest Path Tree の計算の中で、Receiver から SOF や RCF に到達する経路があると判断し間違った経路を設定する可能性がある。

この問題を解決するため、本機構では UDL Hello に規定を追加した。Receiver は RCF および SOF へ UDL Hello を送信する経路がエリア内になくなった

と検知するようにし、RCF および SOF は Receiver からの UDL Hello を受信しない場合、リンク状態が不通になったと検知して新しい Network LSA を作成する。このため、Shortest Path Tree の作成の中で Receiver から UDL を経由した経路を計算しないようになる。

次に、UDL 上のノードによるエリア間の経路制御は、UDL を経由して到達できるネットワーク情報を RCF や SOF が広告することで実現する。Receiver が ABR の場合、本設計で新たに定義した UD Summary LSA を作成し、UDL 上の隣接ルータだけに広告する。UD Summary LSA を保持する RCF (または SOF) は、そこから得たエリア間の経路情報を Type 3 Summary LSA で広告する。

UDL 上では RCF 以外のノードは直接 LSDB を同期させない。しかし、UDL 上のノードが ABR として動作する場合、UDL 上で LSDB の同期を行わないとエリア間の経路制御ができないトポロジがある。例えば、図 1.6 のトポロジでは Receiver はバックボーンに UDL だけで接続している。

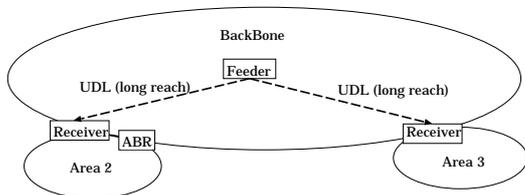


図 1.6. Receiver がエリア内のネットワークプレフィクスを他のエリアに広告する必要があるトポロジ

本設計では、UDL を用いたエリア間の経路情報を広告するため、2 種類の LSA を定義する。

- UD Summary LSA (Type 12)
エリア外のネットワークプレフィクスへの到達性情報を広告する。
- UD Summary LSA (Type 13)
エリア外の ASBR (AS 境界ルータ) への到達性情報を広告する。

Receiver または RCF は UDL 上のノードが ABR の場合に UD Summary LSA を作成し、Link Local Scope でこの LSA を同期させる。

UDL 上で直接通信できないノード間 (Receiver から RCF や SOF へ、RCF から SOF へ) では、Database Description パケット、Link State Update パケット、Link State Acknowledgement パケットは UDL Hello で通知した Return Address 宛にユニ

キャストで送信される。

他のルータが作成した UD Summary LSA を持つ RCF、SOF は Summary LSA を作成し、その内容をエリア内に広告する。UDL Hello により UD Summary LSA の作成元のルータと接続が切れたと判断された場合、RCF と SOF は LSDB 内の UD Summary LSA を破棄する。また、MaxAge を設定した Summary LSA を作成し、UD Summary LSA の情報を元に作成した Summary LSA を OSPF ドメイン内から排除する。

そして 3 つめに、AS 外部経路へは、AS 境界ルータ (ASBR) が External LSA によって広告する。

OSPF では、AS 外部の経路を AS External LSA によって広告する。AS External LSA は ASBR が作成し、スタブエリア以外の全エリアにフラディングされる。OSPF ルータは自分から最短のコストで到達できる ASBR を経由して AS 外へ到達する。エリア外の ASBR までの経路は、ABR が広告する Type4 Summary LSA から計算する。エリア間経路制御と同様、UDL 上のノードが ABR の場合は RCF または SOF がエリア外の ASBR までの到達性を広告する。

また、OSPF ルータはエリアごとに LSDB の同期リストを保持し、隣接するルータ間では、そのエリア内の同期リストにある LSA を同期させる。しかし UDL 上では、RCF 同士以外のルータ間ではこのような LSDB の同期を行わない。ただし、Receiver と RCF、Receiver と SOF、RCF と SOF の各ノード間では隣接ノードごとに個別の同期リストを保持し特定の LSA を同期させる。

Receiver または RCF から UDL Hello を送信するとき用いる経路によって、LSA の同期リストをどのように変化させるか表 1.2 に示す。

1.4.3 評価

評価項目は規模性、安定性、適応するトポロジの三項目である。

まず、規模性の比較による評価を行う。

各ルータが Shortest Path Tree を計算するネットワークの範囲を限定することによって、大規模なネットワークで動作する場合にルータの負荷を抑える。これにより遠隔ネットワーク内のトポロジを隠蔽し隣接ルータと同期させる LSA の数を抑える。したがって、OSPF を利用する際にエリアを柔軟に設

表 1.2. LSA の同期リスト

UD Hello を送信する経路	LSA の同期リスト
エリア内の経路	無し
エリア間の経路	自分自身が作成した UD Summary LSA
AS 外の経路	自分自身が作成した UD Summary LSA 直接接続するエリア内の ASBR が作成した AS External LSA

定できる機構は規模性に優れている。

大規模な UDL を含むネットワークで動作させた場合、トンネリングを用いた解決法では LSDB を同期させるために必要な時間が増加する。特に衛星回線は地上回線に比べて遅延が大きいため、通常回線に比べて LSDB の同期にかかる時間が長い。その上、トンネリングを用いた解決法では多数のノード間で LSDB の同期作業が必要であり、経路の収束時間が大幅に増加すると考えられる。

本研究の設計では、衛星回線上で直接同期を行う必要がある LSA の数が少ない。特に、UDL に接続するノード間にエリア内で BDL による接続性がある場合、UDL 上では LSDB の同期作業を行わない。このため、OSPF の収束時間に大きな影響を与えない。また、本研究はあらゆるトポロジでエリアを形成することを想定しており、OSPF の高い規模対応性を保っている。

次に、安定性の比較による評価を行う。経路制御プロトコルは、あらゆるトポロジにおいて常に最適な経路を設定し安定して動作することが望まれる。特に、経路にループが生じない点と、Route Flap(経路が短い時間で何度も切り替わること)が生じない点は動的な経路制御を行う上で最も重要な機能である。

本研究の設計では、UDL Hello を送信する経路によって UDL 上のノード間にどのような接続性があるか検知する。これをエリア内で到達性がある場合、エリア間の経路で到達性がある場合、AS 外の経路で到達性がある場合に分け、それぞれ別の動作を規定している。UDL Hello を送信する経路は既存の OSPF 機構に依存しており、OSPF が迅速性 [131] と安定性 [16] によって正確な接続性を検知する。このため、ネットワークトポロジに変化が生じた場合、それに適応した動作を行いループを回避できる。

3 つ目に、適応トポロジの比較による評価を行う。トンネリング機構を用いて OSPF を動作させた場合、RCF と SOF が存在するトポロジ、UDL 上の受信ノード (Receiver または RCF) と送信ノード

(RCF または SOF) がエリア外 (または AS 外) の経路によって通信し、LSDB を同期させてしまうトポロジで問題が生じる。

UDL 上における論理的な接続性を RCF と SOF が別個に Network LSA を広告することで、各 OSPF ルータが正しいトポロジデータベースを保持し正確な Shortest Path Tree を計算できる。したがって、RCF と SOF が存在するトポロジにおける問題を解決している。

もう一つのトポロジでは、UDL 上の受信ノードが接続するネットワークと送信ノードが接続するネットワークが UDL によって片方向にだけ接続している。既存の解決手法では、受信ノードが接続するネットワークから UDL を経由して送信ノードが接続するネットワークに到達する経路が計算されてしまう。しかし、本機構では 2 つのネットワークが UDL だけで接続されている場合、Router LSA と Network LSA によって UDL がダウンしたと広告する。これによって、UDL がエリア内の経路として計算せず、その代わりに片方向のエリア間ルーティングを行う。このように、2 のトポロジにおける問題を解決した上で、UDL をエリア間ルーティングにより有効に利用可能となった。

第2章 衛星ネットワーク運用手法の研究

2.1 C-band UDL ネットワークの構築と SOI-ASIA プロジェクトとの連携

AI³ プロジェクトでは、C-band の周波数帯を使用する衛星回線に受信のみの接続性を持つ (Receive Only:RO) サイトをアジア各国に設置した。図 2.1 に示す組織がパートナーとして AI³ プロジェクトに加わり、衛星回線を片方向通信路 (UDL) として用いる広域ネットワークが構築された。

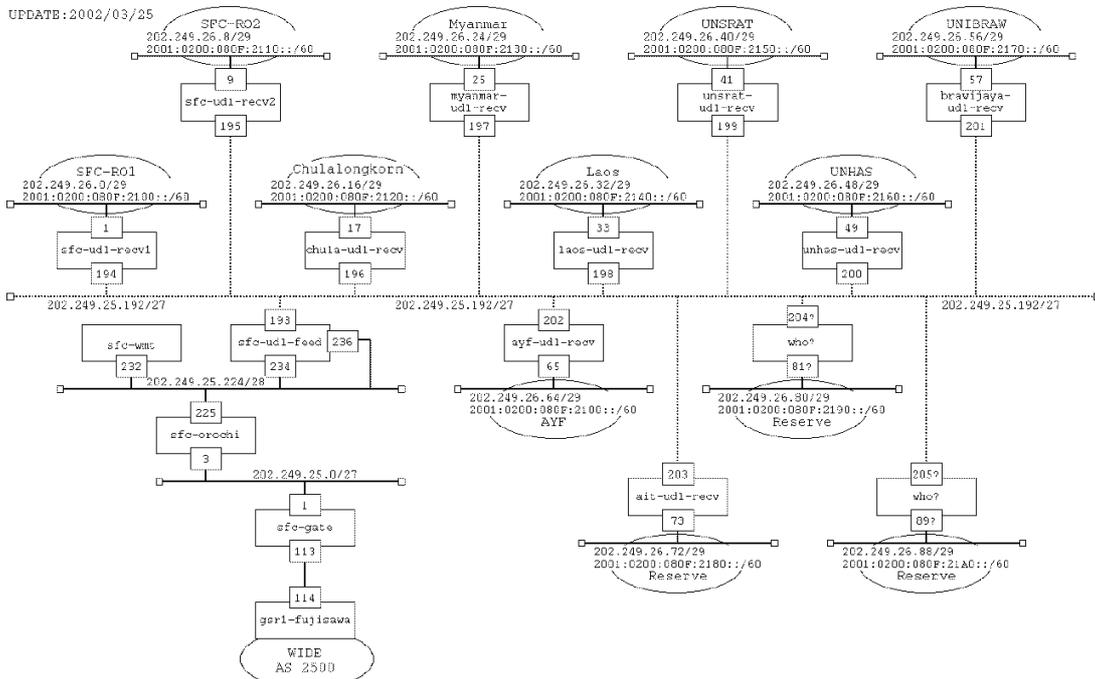


図 2.1. AI³ C-UDL ネットワークトポロジ図

UDL を含むネットワーク上で双方向の通信を行うため、UDLR における Feed の機能を実装した Bridge が SFC に導入され、Receiver の機能を実装した受信モデムが各サイトに導入された。これにより、SFC および各サイトに設置した衛星ルータを改変することなく、衛星回線を用いた双方向の通信を仮想的に実現できるようになった。UDLR 環境におけるマルチキャスト経路制御には DVMRP を用いた。衛星回線の特性に合致したマルチキャストの通信が可能なネットワークが構築された。これを図 2.2 に示す。

SOI-ASIA プロジェクトでは、AI³ プロジェクト

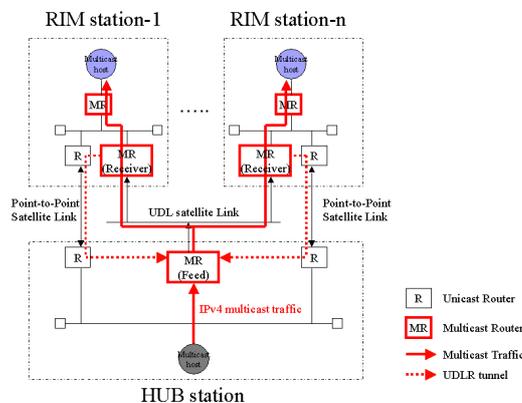
が提供する UDL ネットワークを用い、マルチキャストによって授業アーカイブをアジア各国の RO サイトに配信した。また、リアルタイムでの遠隔授業を日本からアジア各国に向けて行った。

2.2 新たな IP アドレスブロックの取得に伴う AI³ ネットワークのリナンバ

WISH では、AI³ プロジェクトと共同で、衛星回線を含むネットワークの運用を行っている。

AI³ プロジェクトに参加するパートナーが増加し、ネットワークを構成する機器が多様化するにつれ、これまで使用してきた IP アドレスブロックでは十分な運用を行うのが困難になった。このため、新たに IP アドレスブロックの割り当てを申請し、取得した。

これに伴い、2001 年 11 月から 2002 年 3 月にかけて AI³ ネットワークの衛星ルータをはじめ、全ホストの IP アドレスをリナンバした。AI³ ネットワークの IP アドレスブロックが拡大したことで、UDL ネットワークの円滑な構築や新たなサービスマシンの柔軟な設置が可能となった。リナンバ後のネットワーク構成は、図 1.4 で示したのと同様である。



Multicast routing on AI³

図 2.2. AI³ Multicast Routing におけるパケットの流れ

2.3 ネットワークの安定維持に関する取り組み

2.3.1 複数のルータの遠隔監視機構の構築

WISH では昨年度、衛星モデムの遠隔監視機構 (MWD:ModemWatchDog) をネットワークに導入し、衛星モデムや衛星回線の状態をインターネットを介して Web 上で監視できるようになった。本年度は MWD に加え、各ルータの状態を Web 上で遠隔監視する機構を新たに導入した。

本機構は、各ルータが正しく動作しているかを監視する。SFC に設置した遠隔監視サーバが以下に示す情報を各ルータから定期的に取得し、データベースに蓄積する。あるルータの動作に異常があった場合には、その状態を示す警告が Web 上に表示される。ネットワーク管理者は当該サーバの Web を参照することで、複数のルータを一元的に監視でき、ネットワークの管理がより効率的に行えるようになった。

- インターフェースの UP/DOWN
- サービスを行うプロセスの UP/DOWN
- ディスク容量
- Point-to-Point リンクへの経路の有無
- デフォルトルートの有無

現在、衛星ルータの遠隔監視機構は SFC に設置された衛星ルータを対象として機能している。将来的には本機構を AI³ ネットワークの各サイトに設置し、SFC と各サイト間でのデータベースを同期させる機能を実装する。これにより、衛星回線の HUB 局として機能する SFC 側から、各サイトの衛星ルータの状態も一元的に監視できるようになる。

2.3.2 経路制御デーモンの監視スクリプトによる経路の安定維持

AI³ ネットワークの基幹ルータにおいて、経路制御デーモンの挙動が不安定になる事態がしばしば発生した。これに対応するため、ルータで動作する経路制御デーモンに特化した監視スクリプトを各ルータに導入した。

本スクリプトは、一部のルータで経路制御デーモンに不具合が生じた際に、自動的に当該プロセスを再起動する。これにより、管理者が把握できないわずかな時間であっても、経路制御デーモンの異常を感知し正しく動作させられるようになった。

本スクリプトでは、プロセスの再起動を行うたびにその動作内容が管理者にメールで通知される。ま

た、異常が起こった時間とその内容、および動作が回復した時間はあらかじめ定められたファイルに記録されるため、管理者が時系列的に不具合の内容を把握するのに有効である。

2.4 ネットワークセキュリティの強化

これまで各パートナーは独自にセキュリティポリシーを定め、ネットワークの運用を行ってきた。しかし、セキュリティポリシーが異なるネットワーク間で管理者が横断的な作業を行うのは困難であり、ネットワークの安全性もパートナーごとに格差があることがわかってきた。

したがって、ネットワーク全体のセキュリティレベルを底上げし、より明確で統一されたセキュリティポリシーを導入するための議論をパートナーと行った。その結果、以下に示す点について各パートナーの合意が得られた。

● IP フィルタの設置

各ネットワークの Gateway ルータにおいて、各ルータやホストごとにサービスポートへのアクセス制限を設けた。

● SSH によるアクセス元の制限

各マシンに SSH を用いて接続する際に、特定のネットワークからのみ接続できるようアクセス元の制限を設けた。また、UNIX パスワードの使用を全面的に廃止し、RSA 認証を用いた SSH アクセスのみが可能となるようにした。

現在、以上に示した点以外の項目についてもパートナー間で議論され、定められたポリシーに沿って、段階的にネットワークセキュリティの強化が行われている。

2.5 Vietnam のパートナーへの参加

本年度、新しいパートナーとして Vietnam が AI³ ネットワークに参加した。衛星回線を用いた Point-to-Point リンクは以下に示す段階を経て確立された。

- 5月29日...UAT を行い衛星回線上で双方向のリンクを確立した
- 6月11日...SFC、Vietnum 両端のルータにおいて Point-to-Point の設定を行い、IP による接続を行った

また、UDL を含めたパートナーへの衛星回線の帯域は以下の図 2.3 に示すように割り当てられている。

AI³ C-Band Carrier Allocation

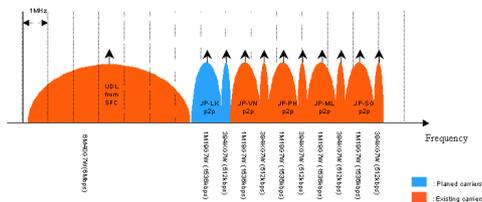


図 2.3. AI³ パートナーへの C-band 帯域割り当て

2.6 その他の活動

2.6.1 Web Cache 実験への参加

AI³ ネットワーク全体で Web Cache の運用と実験を行うため、SFC に Cache サーバを構築した。Web Cache のアプリケーションには squid を使用し運用を開始した。これまで NAIST を中心に Web Cache の実験を行っていたが、今後は SFC を HUB 局として接続する各パートナーもこの実験に参加する予定である。

2.6.2 DNS 権限の委譲

Malaysia のパートナーからの要望により、DNS の管理権限を日本から委譲した。これまで、DNS は日本側で一括して管理していた。しかし、各パートナーが管理するネットワークが安定し、拡大しつつある。このため、今後は徐々に DNS の管理権限をパートナーごとに委譲し、日本による集中管理から各パートナーによる分散管理を行う傾向が強まると考えられる。

2.6.3 AGURI によるトラフィックの解析

AI³ ネットワークの一部でトラフィックが急激に増大し、正しく通信が出来なくなる障害が頻繁に生じた。この主因として、現在多くのネットワークで障害を起している DoS 攻撃が考えられる。AI³ では、SFC 側ネットワークに DoS アタックを監視するための AGURI サーバを構築し設置した。継続的にトラフィックを解析し、AI³ ネットワークが DoS 攻撃による影響をどれだけ受けているかを測定するのに有効である。今後、AGURI によるトラフィック解析の結果を元に、AI³ ネットワークにおける通信の障害について、より具体的な対処法などを検討

する予定である。

第 3 章 まとめ

3.1 本年度の総括

WISH プロジェクトでは、衛星回線を含むネットワークを効率的かつ柔軟に運用するための研究を行い、いくつかの手法が提案され実装された。これらの手法を AI³ ネットワークに構築したテストベッド上で評価し、それぞれ前述のような結果を得た。

衛星回線を UDL として使用することによって、衛星回線を含むネットワークへの参加がより容易になった。このため、AI³ ネットワークはその規模を拡大し、新たなパートナーを数多く迎えた。また、SOI-ASIA プロジェクトとの連携により、実際のサービスを伴って UDL ネットワークの運用を開始した。

各パートナーが管理するネットワークもまた、拡大し安定してきた。これまでは日本側で一括してネットワークを管理してきたが、パートナーそれぞれが分散してネットワークを運用する段階に移行しはじめた。また、より安定したネットワーク運用への工夫やセキュリティの向上などに向け、さまざまな取り組みを行った。

3.2 今後の課題

本プロジェクトでの研究で実装された機構について、セキュリティへの対応や、実ネットワークに適した際のトラフィックへの影響など、いくつかの点で検証や実装の改変が必要であると言える。

また、ネットワークの安定運用を行うための取り組みには、現在もパートナー間での議論が続いたり、実運用に至っていないものもある。より品質の高いネットワークを構築するために、より活発な議論と迅速な協調作業を今後も行っていく予定である。

