修士論文　2001年度(平成13年度)

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の研究

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
藤枝 俊輔

修士論文要旨　2001年度 (平成13年度)

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の研究

本研究では、片方向通信路に対応した経路制御プロトコルを設計し、衛星回線や地上波など片方向に用いる手法が有効な通信路を大規模なインターネットで利用する場合の動的経路制御の問題を解決する。

インターネットが発展すると共に、インターネットへの接続性は帯域、品質、利用できる場所など様々な点で向上が望まれている。それらの要求に応えるには、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。衛星回線は片方向通信路として利用する手法も非常に有効である。その理由は、衛星回線の送信設備に比べ受信専用装置が利用しやすいこと、衛星回線では同時に送信できるノードが一つなのに対し受信ノード数に制限がないことなどである。

しかし、インターネットの経路制御機構は通信媒体が全て双方向通信路であることを前提にしている。そのため、片方向通信路をインターネットで用いる場合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。しかし、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。

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 (Open Shortest Path First) 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。本研究で設計した拡張機能は既存のOSPFプロトコルと互換性を持つ。片方向通信路に直接接続するルータ上で動作させることで、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。これによって、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、地域や国家を越えた広域ネットワークの構築が可能になる。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。

キーワード
1 インターネット　2 衛星回線　3 UDL　4 経路制御　5 OSPF

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科
藤枝 俊輔

Abstract of Master's Thesis   Academic Year 2001

The Design of Extention for OSPF Handling Uni-directional Links

This Paper describes the design of Extension for OSPF(Open Shortest Path First) for handling uni-directional links.

With the Expansion of the Internet, we are faced with new demand of network connectivity, for example bandwidth, quality of service, and mobility. Satellite Link has many unique features that terrestrial links do not have. The use of satellite links for the Internet enables wide area collaboration, broadcasting, and connectivity in time of disaster.

However, Intenet technology assumes all link are bi-directional and do not take advantage of the broadcast nature of Radio Frequency communications. Especially, routing protocols in the Internet are not designed to work on networks with uni-directional links. Therefore using satellite links in the wide area Internet is difficult. To solve this problem, IETF UDLR working group proposes a link layer tunneling mechanism that emulates broadcast connectivity in uni-directional link. However, this method causes the routing loop in some network topologys, and does not solve the problem completely.

This Paper describes the design of Extension for OSPF for handling uni-directional links. OSPF is the most popular routing protocol in the internet, and it is very scalable. Our extension is compatible with general OSPF implementation. Using our extension in routers that directly connected to uni-directional link enables all ospf routers to generate the correct routing table. Our extension can correspond to all scale of uni-directional links. Furthermore, it can handle networks which are connected to other parts of their autonomous system by uni-directional link only.

Uni-directional Link is not specific to satellite links. Other networks such as terrestrial radio networks also can be used as uni-directional links. We can use this extension in any type of uni-directional link.

Key Word

1 Internet   2 Satellite Link   3 Uni-directional-link   4 Routing   5 OSPF

Keio University Graduate School of Media and Governance
Shunsuke Fujieda

目次

第1章 序論 **1**
- 1.1 インターネットにおける衛星回線の利用 1
- 1.2 片方向通信路 2
- 1.3 UDL用いる場合の問題点 3
- 1.4 本研究の目的 4
- 1.5 本論文の構成 4

第2章 問題点 **5**
- 2.1 経路制御プロトコルの問題 5
  - 2.1.1 RIP 5
  - 2.1.2 OSPF 6
- 2.2 既存の解決方法の問題点 6
  - 2.2.1 仮想ブロードキャストリンク 6
  - 2.2.2 トンネリングの問題 7
  - 2.2.3 RCFとSOFが同時に存在した場合の問題 11

第3章 OSPFの拡張 **12**
- 3.1 OSPFの概要 12
- 3.2 OSPFの拡張機能 12
  - 3.2.1 Demand Circuit 12
  - 3.2.2 NSSA Option 14
  - 3.2.3 Opaque LSA 15
- 3.3 本研究が対象とする問題点 16
  - 3.3.1 リンクの状態検知 16
  - 3.3.2 大規模性 16
  - 3.3.3 ASにUDLだけで接続するネットワーク 17
  - 3.3.4 エリア間経路制御・エリア分割で生じる問題の解決 17
- 3.4 既存の拡張方法の適用 18

第4章 衛星回線を用いたネットワークの構築 **20**
- 4.1 衛星回線の利用形態 20
- 4.2 ネットワーク構成の原則 20
- 4.3 Simple UDL 21

4.4 Point-to-Point リンク . . . 21
4.5 UDL メッシュ . . . 22
4.6 Complex UDL . . . 24
4.7 リンクレイヤ技術を用いた場合 . . . 26
4.8 抽象化 . . . 26

第 5 章 設計 28
5.1 本設計の概要 . . . 28
5.2 エリア内経路制御 . . . 29
  5.2.1 エリアの定義 . . . 29
  5.2.2 解決すべき問題点 . . . 29
  5.2.3 既存の経路計算機構との互換性 . . . 30
  5.2.4 本研究の解決法 . . . 30
  5.2.5 SOF からの接続性 . . . 31
5.3 UDL の状態検知 . . . 33
  5.3.1 UDL Hello . . . 33
  5.3.2 RCF における動作手順とルータの状態遷移 . . . 34
  5.3.3 SOF における動作手順とルータの状態遷移 . . . 35
  5.3.4 Receiver における動作手順とルータの状態遷移 . . . 35
5.4 LSA の作成 . . . 35
  5.4.1 Network LSA . . . 35
  5.4.2 Router LSA . . . 37
5.5 エリア内経路計算の例 . . . 38
5.6 エリア分断時の動作 . . . 40
  5.6.1 エリアが分断されたトポロジ . . . 40
  5.6.2 D-bit オプション . . . 41
5.7 エリア間ルーティング . . . 42
  5.7.1 既存のエリア間ルーティング . . . 42
  5.7.2 UD Summary LSA . . . 43
  5.7.3 UD Summary LSA を用いたエリア間の経路制御の例 . . . 45
  5.7.4 各エリア間で広告する経路 . . . 46
  5.7.5 通常エリア間の直接接続 . . . 48
  5.7.6 エリア分割時の動作 . . . 49
  5.7.7 バックボーンエリアにおける制限 . . . 51
5.8 AS 外経路のルーティング . . . 52
5.9 LSDB の同期 . . . 54

第 6 章 評価 56
6.1 規模性の比較 . . . 56
  6.1.1 評価内容 . . . 56

6.1.2 評価結果 56
6.2 安定性の比較 57
6.2.1 評価内容 57
6.2.2 評価結果 57
6.3 適応トポロジの比較 57
6.3.1 評価内容 57
6.3.2 評価結果 57
6.4 評価のまとめ 58

第7章 まとめと今後の課題 59
7.1 まとめ 59
7.2 今後の課題 60

図目次

1.1 片方向通信路を含むネットワーク 2
1.2 衛星上でデータの多重化システムを用いた UDL ネットワークの構成例 3

2.1 RIP の動作 5
2.2 OSPF の動作 6
2.3 Receiver から Feeder へのトンネリング 7
2.4 仮想ブロードキャストリンクの階層構造 8
2.5 Receiver が AS 内に UDL でしか接続されていない場合 9
2.6 Receiver が OSPF エリアに UDL でしか接続されていない場合 9
2.7 エリアが分割による問題 10
2.8 RCF から SOF へのトンネリングが経路として使われてしまう 11

3.1 OSPF の拡張による Demand Circuit の拡張 13
3.2 NSSA Option を適用したネットワーク 14
3.3 Opaque LSA ヘッダのフォーマット 16
3.4 AS に片方向にだけ接続するネットワーク 17
3.5 遠隔ネットワークを一つのエリアに設定したトポロジ 18

4.1 Simple UDL におけるルータのインタフェース構成とサブネット構成 21
4.2 Point-to-Point リンクにおけるルータのインタフェース構成とサブネット構成 21
4.3 スター型トポロジ 22
4.4 UDL メッシュトポロジ 23
4.5 UDL メッシュリンクにおけるルータのインタフェース構成とサブネット構成 23
4.6 Complex UDL におけるルータのインタフェース構成とサブネット構成 25
4.7 個別の回線を用いた場合 25
4.8 衛星ブリッジを用いた場合における各ルータのインタフェース構成とサブネット構成 26

5.1 エリアの形成 (1) 29
5.2 エリアの形成 (2) 29
5.3 エリア内の全てのルータが同一の LSDB を保持するトポロジ 31
5.4 RCF と SOF が存在するトポロジ 32
5.5 UDL 上の接続性を別個に広告する 32
5.6 UDL_Hello のパケットフォーマット 33

5.7 マルチアクセスネットワークをノードとして扱う 36
5.8 UDLネットワークをノードとして扱った場合 36
5.9 SOFからの接続性を個別のNetwork LSAで広告 37
5.10 Link Infomation 37
5.11 RCFとSOFが存在するトポロジ 38
5.12 ルータY、ルータZで計算されるShortest Path Tree 39
5.13 エリアが分断されたトポロジ 40
5.14 ルータX、ルータYで計算されるShortest Path Tree 42
5.15 Summary LSAによるエリア間の経路広告 43
5.16 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 43
5.17 UD Summary LSAのフォーマット 44
5.18 Type 12 UD Summary LSAによるエリア間の経路制御 45
5.19 BGPによるpartition healing 46
5.20 エリア内の経路情報を他エリアに広告する必要があるトポロジ 47
5.21 通常エリアの直接接続 48
5.22 多数のエリアにまたがる衛星リンク 49
5.23 エリア分割時におけるエリア間経路制御 50
5.24 エリアが3つ以上に分割されたトポロジ 50
5.25 バックボーンエリアが分割されたトポロジ 51
5.26 UD External LSAによるAS外部経路の広告 53

表 目 次

4.1 スター型トポロジにおけるRCFの送信周波数、受信周波数 22
4.2 UDLメッシュトポロジにおけるMCRCFの送信周波数、受信周波数 23
4.3 各接続形態における周波数個数と最大ホップ数 24
4.4 各ノード間の接続性 27

5.1 Network LSA内の情報 32
5.2 NodetypeフィールドとReturn Addressフィールドの値 34
5.3 LSAの同期リスト 55

第1章　序論

本章では、インターネットにおける衛星回線の利用形態を述べる。また、インターネットで衛星回線を用いる場合に生じる問題点を示し、本研究の目的を述べる。

1.1　インターネットにおける衛星回線の利用

インターネットが発展すると共に、様々な通信媒体をインターネットで利用する技術が開発されている。インターネットへの接続性は帯域、品質、利便性など様々な点で向上が望まれている。それらの要求に応えるには、各通信媒体の特性を活かしたアプローチが有効である。例えば、IEEE802.11b規格の無線LANが登場し、オフィスや家庭で柔軟性のあるネットワークを構築できるようになった。また、アナログ電話線とDSL技術によって一般利用者が広帯域なインターネット接続ができるようになった。

静止軌道衛星を用いた衛星回線もインターネットで利用が進んでいる通信媒体である。衛星回線は広域性、同報性、回線設定の柔軟性、耐災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、次のような通信環境を実現する。

- 地理的に遠く離れた地点間を直接接続できる
- 同じ情報を同時に複数の受信局に送信できる
- ネットワーク構成を動的に変更できる

広帯域な地上回線が利用できない地域では、インターネットにおける衛星回線の利用への要求が高い。現在、家庭や小規模ネットワークからISPに接続するための技術が発達し、多くの人々が広帯域にインターネット接続できるようになった。しかし、DSL、CATV網、FTTHなどのサービスは利用できる地域が限られている。そのため、インターネット先進国と呼ばれる国々でも、地理的な理由からこれらの高速回線を利用できない場合がある。発展途上国では経済的な問題から地上系の通信インフラが整備されていない地域が多く、衛星回線のように簡単に回線を設置できる通信媒体の利用が強く求められている。

衛星回線には、上述した長所があると同時に、通信に用いる場合の短所もある。例えば、降雨減衰や雑音によって通信品質が劣化する。また、使用できる周波数資源には物理的な制限が存在する。地上から送信したデータが衛星で折り返され再び地上に届くまでに約1/4秒の遅延が発生する。[1][2] このような衛星回線の特徴と既存の通信技術との親和性を向上させる研究が現在広く行われている。

1.2 片方向通信路

衛星回線では、送信装置よりも受信装置が格段に利用し易い。衛星回線の送信装置は高価なのに対し、デジタル衛星放送の普及により受信専用装置は安価になっている。これに加え、衛星回線では同一の周波数帯を使って同時に送信できるノードが一つなのに対し、受信ノード数には制限がない。こうした観点から、近年インターネットにおいて衛星回線を片方向の通信路として用いる手法が考えられている。本論文では、片方向にデータを伝搬する通信路を Uni-Directional-Link(UDL) と呼ぶ。これに対し双方向の接続性を提供する通信路を Bi-Directional-Link(BDL) と呼ぶ。UDL には次の 3 種類のノードが接続する。

- 送信能力だけを持つノード (Send Only Feeder、以下 SOF)
- 送受信能力を持つノード (Receive Capable Feeder、以下 RCF)
- 受信専用ノード (以下 Receiver)

また、本稿では RCF と SOF を総称して Feeder と呼ぶ。UDL を用いたネットワーク例を図 1.1 に示す。

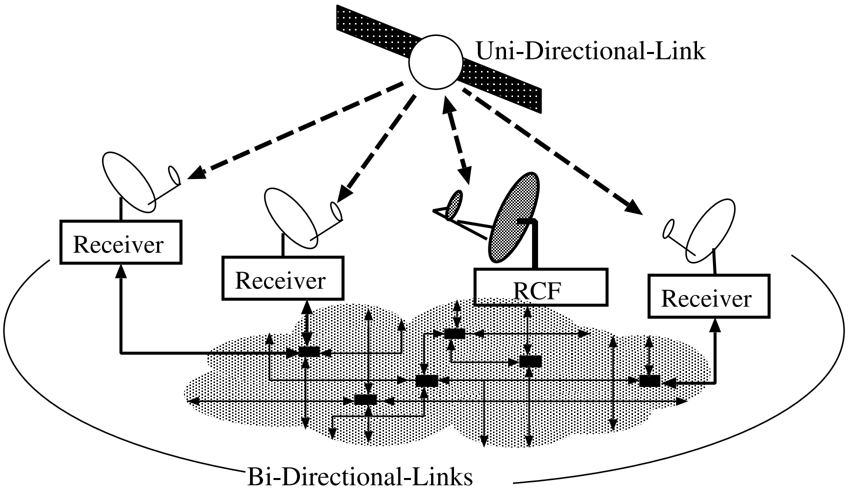

図 1.1: 片方向通信路を含むネットワーク

衛星回線では一つの周波数に対し同時に送信できるノードは一つである。このため、一つの UDL に接続する Feeder は一つの場合が多い。しかし、衛星ブリッジや Skyplex[3] など DVB の多重化システムによって、これらの制限は緩和されつつある。衛星ブリッジは Ethernet セグメントに流れたデータを衛星回線にデータリンク層で転送したり、その逆を行う装置である。これを用いて、イーサネットに接続する複数のノードが同一の UDL に送信できる。

また、DVB の多重化システムはデジタル衛星放送分野において開発された機構である。この機構では、複数の送信局が別々の周波数帯を用いて衛星にデータを送信し、衛星上においてデータを多重化し一つの周波数帯に放送する技術である。これをインターネット上で応用した場合、同一の Receiver グループに複

数の Feeder からデータを送信できる。衛星上でデータの多重化システムを用いた UDL ネットワークの構成例を図 1.2 に示す。

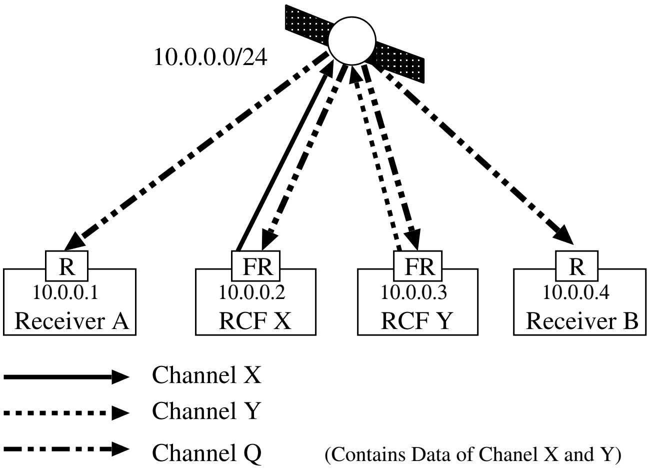

図 1.2: 衛星上でデータの多重化システムを用いた UDL ネットワークの構成例

インターネットでは、ネットワークのトラフィック傾向や利用目的に合わせて UDL を用いる。例えば、メーカーから各販売店へ商品情報を配布する場合、地理的に広く分散した環境で送信ノードから多数の受信ノードへ同一のデータを配布するため UDL を用いたシステムが用いられている。また、インターネット利用者のトラフィックは送信データ量よりも受信データ量が大きい傾向がある。地上回線によって十分な帯域が得られない地域では、この傾向に合わせ、データの送信に地上回線、受信に広帯域な衛星回線を用いるシステムが利用されている。

1.3 UDL 用いる場合の問題点

既存のインターネット技術は通信路の双方向性を前提として開発されており、UDL を用いたネットワークでは経路制御に問題が生じる。第一に、経路制御プロトコルの問題がある。RIP[4] や OSPF[5][6] など動的経路制御プロトコルは隣接ノードと直接通信し、お互いの経路情報を交換して経路を決定する。しかし、UDL では RCF 同士の通信を除き双方向にデータを送受信できないため、これらの機構が正しく動作しない。これを解決するため、UDL 上に仮想的なブロードキャストリンクを構築する技術 [8] が標準化されている。しかし、仮想ブロードキャストリンク機構はトンネリングを用いた短期的な解決法であり、主要なルーティングプロトコルが動作するトポロジに制限がある。第二に、ホストルーティングの問題がある。ホストルーティングでは、直接接続するネットワーク上の終点へパケット送信する場合直接配送を用いる。そのため、Receiver が UDL 上の IP アドレスに対してデータを送信する場合、直接配送しようとし失敗する。また、RCF が SOF にデータを送信する場合データが直接 UDL に送信されるため SOF に受信されない。

1.4 本研究の目的

本研究では、1.2 で述べた問題のうち経路制御プロトコルの問題を解決する。仮想ブロードキャストリンク機構を用いて既存の経路制御プロトコルを動作させた場合、経路制御プロトコルが正しく動作するトポロジに制限があることが分かっている。本研究では、OSPF(Open Shortest Path First) に拡張機能を加え、UDL を含むネットワークにおける動的経路制御の問題を解決する。OSPF は大規模ネットワークに適しており、現在最も広く利用されている経路制御プロトコルである。また、本論文では拡張機能を持つ OSPF ルータと既存の OSPF ルータと互換性を保ち、既存のネットワークで円滑に利用できる経路制御機構を設計する。

また本機構を設計する際の前提として、衛星回線を用いたネットワーク構成を定義する。これまで、衛星回線は極めて単純なトポロジで利用されるケースが多く、そのほとんどは Point-to-Point リンクや送信者が一つだけ存在する UDL リンクであった。しかし現在、周波数帯域や各回線の利用効率が高い利用法が提案されており、UDL をより多様なトポロジで用いる要求が高まっている。将来的に利用が考えられる全てのネットワークトポロジに対応するため、衛星回線を用いたネットワークの抽象化を行い、それに沿った設計方針を立てる。

1.5 本論文の構成

第 2 章では、UDL を含むネットワーク上で経路制御プロトコルが正しく動作しない理由を示し、既存の解決法の問題点を述べる。第 3 章では、OSPF における既存の拡張機能を述べ、本設計との比較を行う。第 4 章では、衛星回線を用いてネットワークを構築した場合のネットワークの抽象化を行う。第 5 章では、OSPF に拡張機構を加え UDL を含むネットワーク上で正しく経路制御を行う手法を述べ、本設計の動作手順を説明する。第 6 章では、本研究で設計した OSPF の拡張機構と既存の仮想ブロードキャストリンクを用いた解決法との比較を述べる。第 7 章では、本論文での議論をまとめる。

第2章　問題点

本章では、UDL を含むネットワークにおいて動的な経路制御を行う場合に生じる問題を述べる。また、この問題の解決するため考案された仮想ブロードキャストリンク機構について述べ、既存の機構の問題点を述べる。

2.1　経路制御プロトコルの問題

2.1.1　RIP

RIP や RIP2[4] などの距離ベクトル型の経路制御プロトコルでは、一定時間ごとに、各ルータが到達可能情報を各インタフェースにデータリンク層でマルチキャストする。RIP では、これを rip-response メッセージと呼ぶ。rip-response メッセージを受け取ったルータは、送信元を経由して到達できるネットワークと到達するまでのホップ数を知る。これを図 2.1 に示す。

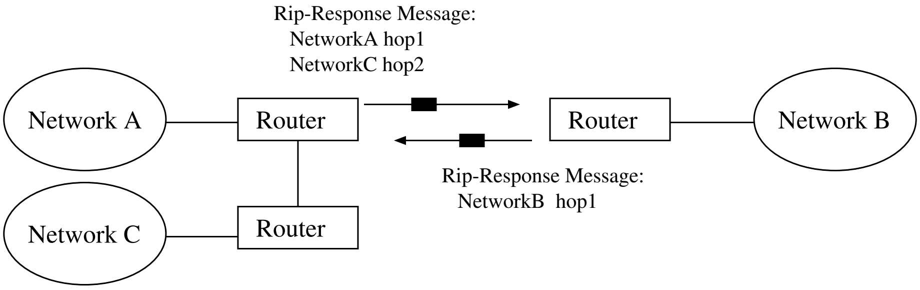

図 2.1: RIP の動作

UDL 上で RIP を動作させた場合、Receiver から Feeder への rip-response メッセージが送信できない。このため、Feeder に Receiver を経由した経路が伝わらず UDL は経路として利用されない。また、RCF から送信した rip-response メッセージが SOF に受信されないため、SCF に RCF を経由した経路が伝わらず UDL は経路として利用されない。

2.1.2　OSPF

OSPF[5][6] はリンクステート型の経路制御プロトコルである。リンクステート型の経路制御プロトコルでは、各ルータは自分と隣接ルータとの接続性を監視し、自分が持つリンク情報を経路制御ドメイン全体にフラッディングする。各ルータは経路制御ドメイン全体から集められたリンク情報からネットワークトポロジを把握し、各終点への最適な経路を設定する。OSPF ではリンク情報を LSA(Link State Advertisement) と呼び、LSA のデータベースを LSDB(Link State DataBase) と呼ぶ。各ルータが作成する LSA をルータ LSA と呼び、OSPF ルータはルータ LSA を作成するため、隣接ルータとの接続性を Hello プロトコルによって監視する。Hello プロトコルでは、一定時間ごとに Hello メッセージを各インタフェースにデータリンク層でマルチキャストする。隣接ルータと Hello パケットを相互に受信し合うと、OSPF ルータは隣接ルータと接続性があると認識する。これを図 2.2 に示す。

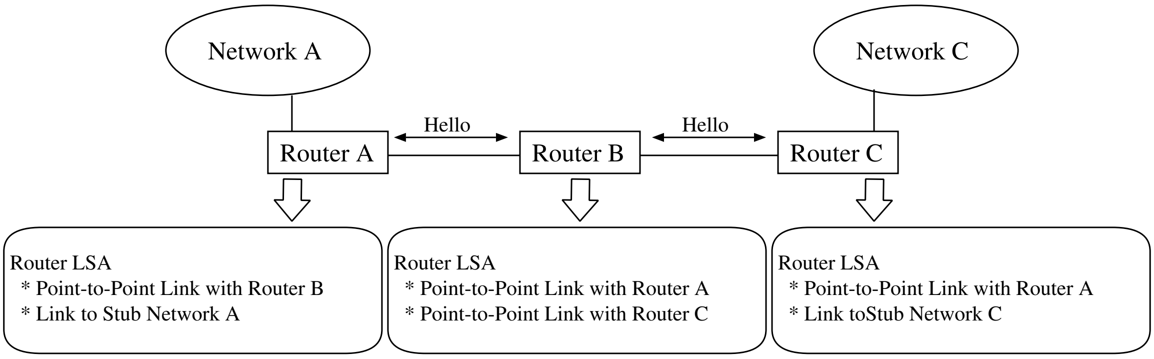

図 2.2: OSPF の動作

Hello プロトコルには、ルータ間の接続性は双方向であるという前提がある。UDL 上では Hello メッセージが片方向にしか流れないため、RCF 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。また、OSPF では隣接ルータ同士が LSDB を同期させる。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、同期ができない。

2.2　既存の解決方法の問題点

2.2.1　仮想ブロードキャストリンク

UDL を含むネットワークにおける経路制御の問題を解決するため、UDL 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標準化されている。この手法では、UDL に通常のブロードキャストリンクと同様の機能を仮想的に実現することで、既存の経路制御プロトコルが動作する環境を構築する。実際のリンクレイヤの機能を上位層に対して隠蔽し、ブロードキャストリンクに見せることによって多くの経路制御プロトコルを動作させる。

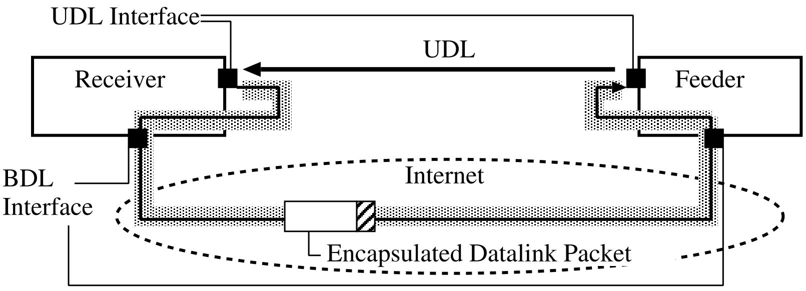

図 2.3: Receiver から Feeder へのトンネリング

以下に仮想ブロードキャストリンク機構の概要を述べる。この機構では、トンネリングによって次の通信路を実現する。

- Receiver から RCF
- Receiver から SOF
- RCF から SOF

Receiver は UDL に送信するデータリンクパケットに GRE[7] ヘッダを付加し、これを IP パケットに格納する。(カプセル化) トンネリングに用いる IP パケットの宛先は Feeder の BDL インタフェースである。Receiver からカプセル化されたパケットを受け取った Feeder は、外側の IP ヘッダ、GRE ヘッダを破棄し元のデータリンクパケットを取り出す。(脱カプセル化) これを図 2.3 に示す。同様に、RCF が SOF にデータを送信する場合、UDL に送信するデータリンクパケットをトンネリングによって SOF の BDL インタフェース宛に送信する。

また、Broad Cast Emulation 機能 (以下 BCE) によって、Receiver 同士の通信と Receiver から UDL にブロードキャスト、マルチキャストする機能をサポートする。Receiver は、他の Receiver へのユニキャストパケット、ブロードキャストパケット、マルチキャストパケットを上述のトンネリングによって Feeder に送信する。Feeder は Receiver から受信した IP パケットから元のデータリンクパケットを抜きだし、UDL に送信する。これにより、Receiver が UDL に送信した場合と同様のデータリンクパケットが UDL に流れる。仮想ブロードキャストリンク機構の階層構造を図 2.4 に示す。

2.2.2 トンネリングの問題

仮想ブロードキャストリンク機構は、UDL を即座にインターネット上で利用することを目的としており、短期的な解決法である。トンネリングはネットワークの階層化構造に違反しているため、他の技術と競合が起こる可能性がある。また、ネットワークに何らかの障害が生じた場合、問題箇所を見付けるのが困難である。

仮想ブロードキャストリンクを用いる場合、Receiver は UDL リンクのコストやメトリックを最大に設定する必要がある。その理由は、Receiver から Feeder への仮想的な経路が通常の経路として利用されるのを防ぐためである。トンネリングによる通信路は上位層にとって単一の通信路に見えるが、実態はIP 層に

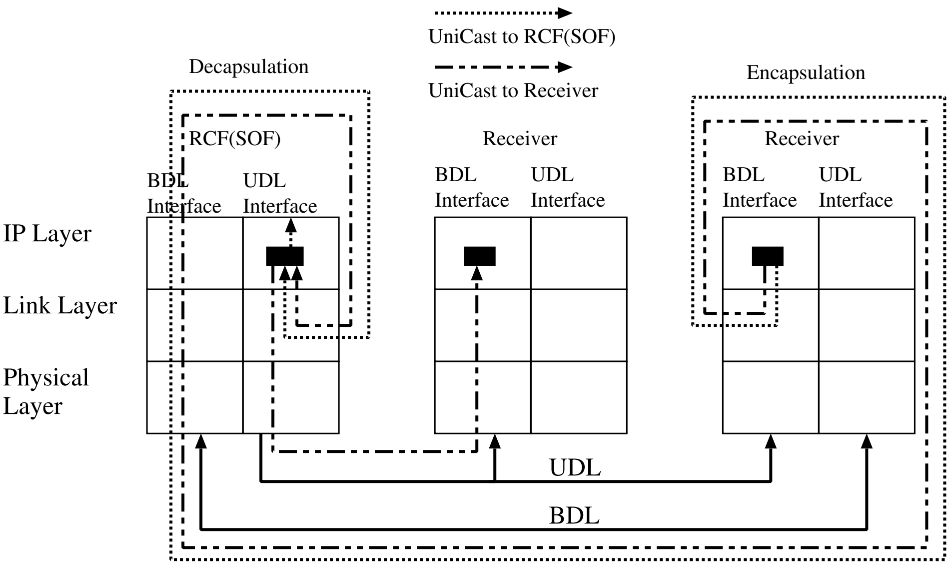

図 2.4: 仮想ブロードキャストリンクの階層構造

おける End-to-End の接続性である。そのため、トンネルを用いた経路はトンネルを使わない経路よりも冗長である。また、トンネリングにはトンネルの入口におけるカプセル化処理と出口における脱カプセル化処理が必要である。

また、Receiver から Feeder にトンネリングする場合、トンネル先の IP アドレスに対する経路は BDL を利用する経路が必ず選択される必要がある。トンネリングに使用する経路が UDL を利用した場合、カプセル化したパケットを UDL に送信しようとし、再びカプセル化してしまう。

しかし、Receiver において UDL のコストを適切に設定した場合も、次のトポロジではトンネリングに用いる経路が UDL に向いてしまう。

- Receiver が AS 内において UDL でしか接続されていない場合
- Receiver がある OSPF エリアに UDL だけで接続している場合

図 2.5 に示すトポロジの場合を考える。

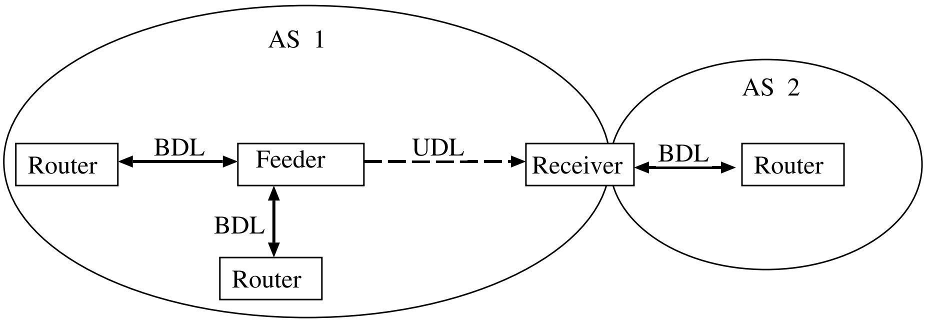

図 2.5: Receiver が AS 内に UDL でしか接続されていない場合

Receiver は AS1 に UDL で接続している。また BDL で AS2 に接続している。このようなトポロジは、一つの AS が広域に分散しており、Receiver が存在するサブネットはアップリンクのため近くのプロバイダに接続している環境で想定される。初期状態では Receiver は AS1、2 の経路情報を持たないため、デフォルトの経路を AS2 に向ければ Receiver から Feeder へトンネリングできる。しかし、Receiver が AS1 内の IGP によって AS1 内の経路を得ると、Feeder の BDL インタフェースへパケットを送信する場合、Receiver の BDL を用いた AS 外経路よりも UDL を用いた AS 内部経路が選択される。既存の経路制御機構がコストや metric に関係なく AS 外部経路よりも AS 内部経路を優先させるからである。このため、Receiver から Feeder への仮想的な接続性が失われ、それがルーティグプロトコルによって検知されると Receiver は AS1 内の経路を失い初期状態に戻る。

OSPF でも似た問題が生じる。OSPF には、経路制御ドメインをエリアと呼ぶ論理的な単位に分割して運用管理する仕組みがある。各エリアのルータは、自分が所属するエリア内だけのネットワーク構成がわかるリンクステートデータベース (Link State DataBase、以下 LSDB と呼ぶ) を保持する。エリア外のネットワークについては、自エリアのエリア境界ルータ (Area Border Router、以下 ABR と呼ぶ) のうち、どのルータの先にそのネットワークがあるかだけを把握する。ここで、図 2.6 に示すトポロジの場合を考える。

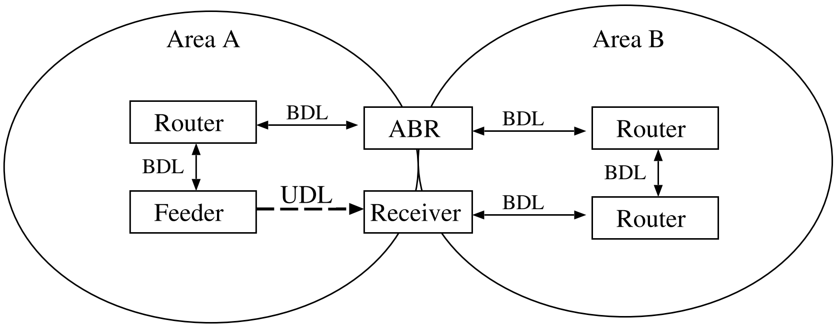

図 2.6: Receiver が OSPF エリアに UDL でしか接続されていない場合

Receiver はエリア A、エリア B 間の ABR であり、エリア A に UDL、エリア B に BDL で接続している。初期状態では Receiver はエリア B 内の他の ABR を経由して Feeder にパケットを送信できる。しかし、Receiver がエリア A 内の経路を得ると、Feeder の BDL インタフェースへパケットを送信する場合、UDL を用いたエリア内経路が選択される。OSPF ではコストに関係なくエリア外経路よりエリア内経路が優先されるからである。このため、Receiver から Feeder への仮想的な接続性が失われ、Hello によってそれが検知されると Receiver は AS1 内の経路を失い初期状態に戻る。Feeder は Receiver と双方向に Hello が流れている間は Receiver を経由してエリア B にパケットを転送できるが、Receiver から Hello が届かなくなるとその経路を使えないと判断する。

OSPF では、あるエリア内のルータは、エリア内の経路によって双方向の通信ができることを前提としている。もし、ある回線が切断されてエリアのある部分同士が通信できなくなった場合、エリア分割が生じる。分割された区分は一つのエリアを形成し、そこにバックボーンエリアと接続する ABR が存在する場合、他のエリアや分割された区分 (エリア) と通信できる。例えば、図 2.7 に示すエリアでエリア分割が起こったとする。

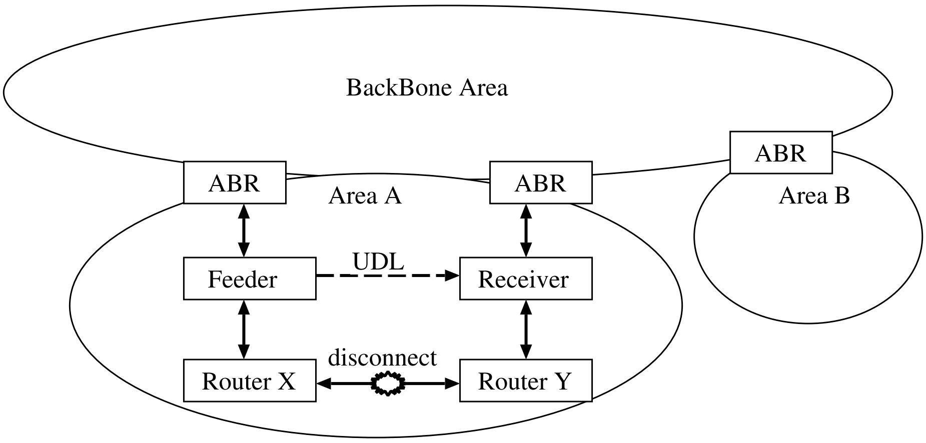

図 2.7: エリア分割による問題

エリア A はルータ X とルータ Y 間の回線が不通になった場合、エリア内部で双方向の接続性がなくなる。しかし、Receiver から Feeder への接続性が仮想的に存在するため、エリア A がすぐに分割されたと検知されない。Receiver は Feeder の BDL インタフェースへカプセル化パケットを UDL に送信し失敗する。エリア Y など Receiver と同じ区分に存在するルータも、Feeder 側の区分にパケットを転送するため Receiver を経由しようとし失敗する。Hello によって UDL リンクの接続性がダウンしたと検知されるまでエリアは分割されない。エリア分割後はエリア A は 2 つのエリアとして動作する。この時、Receiver は ABR を経由しバックボーンを通って Feeder の BDL インタフェースにパケットを送信できるようになり、Receiver から Feeder への仮想リンクが使用可能になる。すると再びエリア A が一つのエリアになったと検知され、同様の問題が生じる。この状態はエリア A が完全に一つのエリアに戻るまで続く。

2.2.3　RCF と SOF が同時に存在した場合の問題

仮想ブロードキャストリンク機構を用いる場合、Receiver は UDL のコストを最大に設定するが、RCF や SOF は通常のブロードキャストリンクと同様に適切なコストを設定する。図 2.8 に示すトポロジを考える。

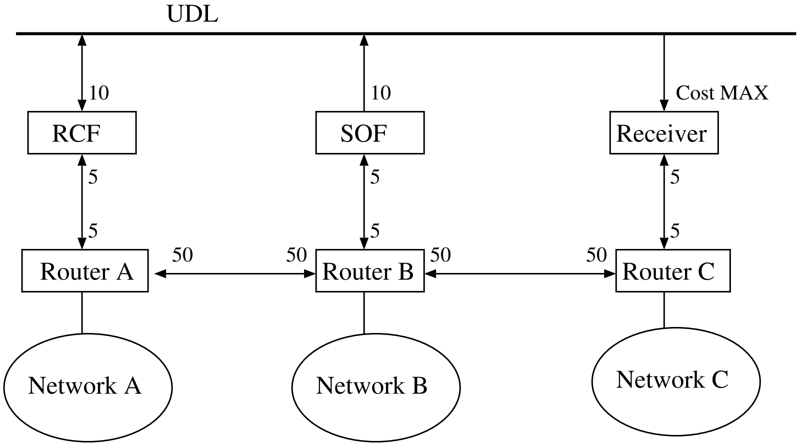

図 2.8: RCF から SOF へのトンネリングが経路として使われてしまう

図 2.8 では、UDL に Receiver、RCF、SOF が接続している。RCF と SOF はそれぞれ UDL のコストを 10 で広告している。ネットワーク A は、UDL を通ってネットワーク C に到達する。この時のコストは、ルータ A - RCF 間のコスト + RCF - Receiver 間のコスト + Receiver - ルータ C 間のコスト (5+10+5=20) である。

ネットワーク A がネットワーク C にパケットを送信した場合を考える。RCF は UDL へのコストを 10 でアナウンスしているため、SOF にも 10 で到達するように見える。このため、ネットワーク A からネットワーク C への最短経路はルータ A - RCF - SOF - ルータ B となる。しかし、RCF - SOF 間はトンネルであり、実際にはカプセル化されたパケットが RCF - ルータ A - ルータ B - SOF という経路で配送される。したがって、ネットワーク A からネットワーク B への見掛け上のコストはルータ A - RCF 間のコスト + RCF - SOF 間のコスト + SOF - ルータ B 間のコスト (5+10+5=20) だが、実際のコストはこれに RCF - ルータ A 間のコスト + ルータ A - ルータ B 間のコスト + ルータ B - SOF 間のコスト (5+50+5) を足した 80 である。ネットワーク A - ネットワーク B 間の本当の最適経路はルータ A - ルータ B という経路であり、そのコストは 50 である。このように、UDL 上では RCF が UDL リンクのコストに設定した値が RCF から SOF へのコストとして計算されるため、冗長な経路が最適なパスとして選択される可能性がある。

第3章　OSPFの拡張

本論文では、OSPFを改変しUDLを含むネットワークにおける動的な経路制御の問題を解決する。本章では、OSPFにおける既存の拡張方法を述べ、これらの拡張方法がOSPFでUDLを扱うために適用できるかを論じる。また、本研究がOSPFに拡張機構を用いることで解決する問題と、対象とするネットワークトポロジを述べる。

3.1　OSPFの概要

OSPFはリンクステート型の経路制御プロトコルである。リンクステート型の経路制御プロトコルでは、各ルータはAS全体を表すトポロジデータベースを持ち、SPF(Shortest Path First)アルゴリズムに基づく手法で経路を計算する。OSPFでは動的にネットワークの状態に対応するため、HELLOプロトコルを用いて隣接ルータとの接続性を監視する。また、同一リンク上にいるルータ間のトポロジデータベースを同期させ、OSPFネットワークに接続する全てのルータが同じトポロジデータベースを持つ事を保証する。OSPFのトポロジデータベースはLink State Advertisement(LSA)から構成され、LSAは各ルータ、マルチアクセスネットワーク、外部経路ごとに作成される。新しく作成されたLSAはフラッディングによってネットワーク全体に伝搬する。また、OSPFはASをエリアと呼ばれる複数の領域に分け、トポロジデータベースを同期させる範囲を限定する仕組みを提供している。エリア内の経路情報はエリア境界ルータがsummaly LSAとして別エリアに広告する。OSPFドメイン外の経路情報はAS境界ルータがexternal LSAとして広告し、external LSAはOSPFドメイン全体にフラッディングされる。

3.2　OSPFの拡張機能

これまで、OSPFには様々な拡張機能が加えられている。そのうち、本論文と関わりのあるものについて述べる。

3.2.1　Demand Circuit

Demand Circuitは、ISDNなど必要に応じてオンデマンドで接続する回線を指す。通常、オンデマンドの回線を利用する場合はアプリケーションからの通信要求によって動的に回線を接続する。しかし、このような回線の両側にOSPFルータが存在した場合、Helloや新しいLSAの広告によって頻繁に回線が接続され、多額の通信料金がかかる。この問題を解決するため、Demand Circuitを通るOSPFのパケットを極力抑制する機構[9][10]が標準化されている。

Demand Circuit では、Hello プロトコルを改変しデータが流れていない場合に Hello パケットによって回線が接続されるのを防ぐ。Demand Circuit を越えて LSA が配送される場合、同じ内容で LS Sequence number だけが更新された LSA は Demand Circuit を越えてフラッディングされない。また、LSA の Age Expire によって LSA が破棄されない。Demand Circuit 対応の概要を図 3.1 に示す。

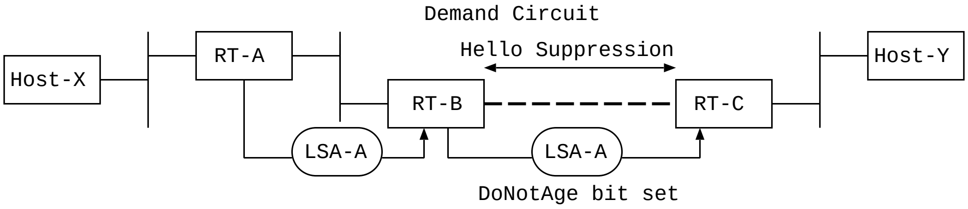

図 3.1: OSPF の拡張による Demand Circuit の拡張

Demand Circuit に対応するため、全ての OSPF ルータに必要な変更点を述べる。- LS age フィールドの左端の bit を DoNotAge bit と定義する。これが設定されているルータの LSA は古くなったと判断されない。
- DoNotAge bit が設定された LSA は次の両方の条件を満たすときに捨てられる。

1. LSA が MaxAge 時間以上データベース内に存在した
2. LSA を作成したルータが MaxAge 以上到達不可だった。

- フラッディングアルゴリズムに次の変更を加える。あるルータで LSA が特定の時間保持された後 flush される場合、そのルータは MaxAge に達した LSA を他のルータにも広告する。現在保持している LSA よりも古い LS Sequence Number の LSA を受け取った場合、自分がデータベースに持っている新しい LS Sequence Number の LSA を送り返す。現在保持している LSA と LS Sequence number が同じで MaxAge の LSA を受け取った場合、自分のデータベースからその LSA を削除する。フラッディングされた MaxAge の LSA は LSA の作成元ルータに伝わり、そのルータは expire した LSA よりも新しい LS Sequence Number の LSA を広告する。

Demand Circuit に対応するため、Demand Circuit に直接接続するルータに必要な変更点を述べる。- Hello を改変。Demand Circuit 間で隣接ルータを検知していない時は、普通よりも長い間隔で Hello を送信する。Demand Circuit 上の隣接ルータと Fulll の state に達した場合、Hello の送信をやめる。
- データリンクの connection を閉じた場合、リンクダウンとして扱わない。何らかの理由でデータリンクが接続できないと診断された場合リンクダウンとする。
- LSA のフラッディングを次のように行う。

1. LSA の内容に変更がない場合は、refresh のための LSA なので Demand Circuit にフラッディングしない。
2. Demand circuit ごしに flood する場合には、LSA に DoNotAge をセットする。

- また、DoNotAge bit は次の条件で使用できる。

1. 通常の OSPF エリアの場合トポロジデータベース内の全ての LSA に DC-bit が設定されている時。
2. Stub エリア、NSSA エリアの場合エリア内の OSPF ルータ全てが DC-bit を設定した LSA を広告している時。

拡張機能を持たない **OSPF** ルータとの共存

- DoNotAge LSA は、エリア内部の全ての LSA に DC-bit が設定されていた場合のみ作成できる。
- DoNotAge に対応していないエリアの Area Border Router(以下 ABR は)、それを indication LSA によって他のエリアに広告する。

3.2.2 NSSA Option

NSSA(Not-So-Stubby-Areas)[11] は OSPF の Stub エリアの拡張である。例えば、図 3.2 において Small Cloud は中規模のネットワークであり、ルータ A とルータ B 間の回線は資源が制限されているとする。RTB はバックボーンに接続するルータである。Small Clound 内部では RIP によって経路制御を行っている。RIP によって学習した経路を RTA が OSPF に広告する場合、RTA は OSPF の通常エリアに属する必要がある。しかし、RTA と RTA-RTB 間の回線はリソースが少ないため、バックボーンエリアに流れる LSA 全てを RTA に流すと、帯域が大幅に消費される。

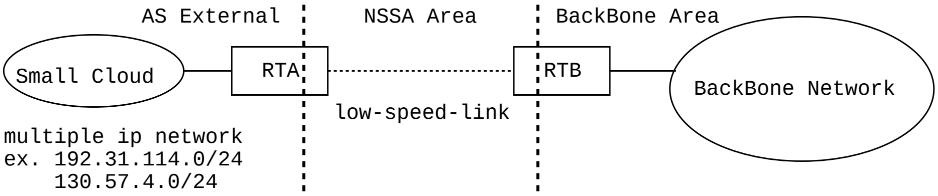

図 3.2: NSSA Option を適用したネットワーク

RTA-RTB 間は回線が細いため、RTA と RTB を接続するネットワークを Stub エリアとして運用することが望ましい。Stub エリアではバックボーンを経由した経路情報の代わりに一つの Default Route を広告するだけでよい。しかし、Stub エリアは AS-External LSA を広告できない制限があり、small cloud の経路情報を広告できない。

この問題を解決するため NSSA Option では、NSSA という新しい OSPF エリアを定義する。NSSA では Stub エリアと同様に AS-External-LSA が流れない。しかし、NSSA の AS Border Router(以下 ASBR) は AS 外への経路を NSSA 内に新しい LSA を使用して広告できる。これを Type-7 LSA と呼ぶ。Type-7 LSA は NSSA 内部にだけフラッディングされる。NSSA エリアと他のエリアを結ぶ Area Border Router(以下 ABR) は Type-7 LSA を Type-5 LSA に変換して送信する。NSSA エリアに属するルータは NSSA Option を使う合意のため、全ての OSPF メッセージの Option フィールドに N-bit flag をセットする。

図 3.2 のように、stub 的にプロバイダに接続し、いくつかの外部経路を広告する必要があるサイトでは、NSSA Option を用いると次の利点がある。

1. Type-5 LSA が NSSA ネットワークに流れない
2. NSSA ネットワークには default の経路だけが流れる
3. NSSA ネットワークが論理的に OSPF に加われる

3.2.3 Opaque LSA

Demand Circuit と NSSA は OSPF の LSA Header 内の Options フィールドを用いていたが、Options フィールドは有限である。そのため、OSPF に付加的な情報を乗せるための規格が Opaque LSA[12] として標準化されている。Opaque LSA の広告は既存のフラッディング機構を用いるが、フラッディングする範囲によって 3 種類の LSA Type が定義されている。

Type-9 LSA
link-local:一つのリンク内だけでフラッディングされる LSA

Type-10 LSA
area-local:一つのエリア内だけでフラッディングされる LSA

Type-11 LAS
entire OPSF routing domain:stub エリアを除き AS 全体にフラッディングされる LSA

Opaque LSA は Opaque LSA を扱う機能を持つルータにだけ広告される。隣接ルータが Opaque LSA に対応しているかは、その隣接ルータと初めて LSDB を同期する時に判断される。Opaque-capable なルータは Database Description パケットの Options フィールドに 0-bit をセットしている。Link State Update パケットを Multicast 配送する場合は、Opaque に対応していないルータにも Opaque LSA が広告されるが、それらのルータはパケットを破棄する。Opaque LSA の LSA ヘッダフォーマットを図 3.3 に示す。Opaque Type フィールドは Opaque LSA がどの用途に使われるかを示す。現在までに、Opaque LSA を使った幾つか OSPF の拡張機能が標準化されており、それら各機能には一意の Type が IANA(Internet Assigned Number Authority) によって割り当てられている。

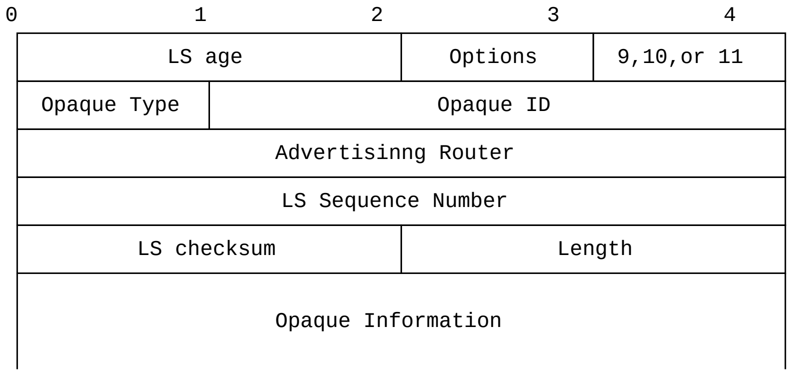

図 3.3: Opaque LSA ヘッダのフォーマット

3.3 本研究が対象とする問題点

本研究では、衛星回線のように片方向にデータを伝搬しあらゆる規模の受信ノードが接続するネットワークを想定する。このようなネットワークを OSPF で経路制御する場合、複数の問題点を解決する必要がある。

3.3.1 リンクの状態検知

OSPF では、各ルータ間を接続するリンクの状態検知と隣接ルータが正常に動作しているのを確かめるため Hello プロトコルを用いる。しかし、2.1.2 節で述べたように Hello プロトコルは UDL 上で動作しない。

OSPF はリンクステート型の経路制御プロトコルであり、正しく経路制御を行うためには全てのリンク情報が正確に収集される必要がある。通常の回線では隣接ルータとの接続性は”ある”または”ない”かだが、UDL では、隣接ルータ同士において片方からの送信だけができる場合、受信だけができる場合、送受信できる場合など接続形態が複数ある。このため、これらの異なる接続形態を正確に検知し経路計算に用いる機構が必要である。

3.3.2 大規模性

OSPF では、隣接するルータは LSDB(Link State Advertisement Database) を同期させる。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、複数台のノードが接続するマチアクセスネットワークにおいて LSDB を同期させる場合、フルメッシュで同期作業を行うと効率が悪いため、DR(Designated Router) を選出し DR を中心に同期作業を行う機能がある。しかし、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。

3.3.3 AS に UDL だけで接続するネットワーク

通常、ある AS 内のネットワークは双方向の回線で接続されている。しかし、衛星回線は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 3.4 に示す。

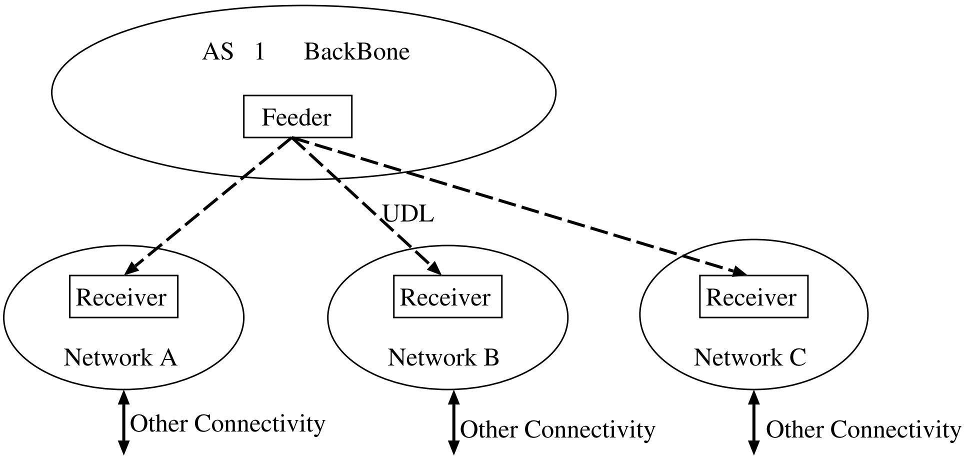

図 3.4: AS に片方向にだけ接続するネットワーク

このようなネットワークでは、UDL の受信ネットワークに対し AS 内の他のネットワークから AS 内経路によって到達できる必要がある。また、受信ネットワークから AS 内の他のネットワークに対し、何らかの経路によって到達できる必要がある。図 3.4 では、バックボーンからネットワーク A、B、C に対し UDL によって到達し、ネットワーク A、B、C は他の接続性によって AS 内に到達する必要がある。

トンネリングを用いた手法では、UDL が双方向性を持つ回線にエミュレートされるため、このようなトポロジで正しい経路制御が行えない。例えば図 3.4 のトポロジでは、ネットワーク A、B、C は AS 内の他のネットワークと接続するリンクが UDL しか存在しないため、AS の終点に到達するために UDL を用いてしまう。この時トンネルの終点が AS 内に存在すると、カプセル化後のパケットも UDL を用いてトンネルの終点に到達しようとし失敗する。

3.3.4 エリア間経路制御・エリア分割で生じる問題の解決

UDLR を用いて OSPF を動作させた場合、UDL 上のルータが ABR として動作しあるエリアに UDL だけで接続していると経路が不安定になる問題を 2.2.2 で述べた。OSPF では、エリア内部のネットワークは必ず双方向性が存在することが前提になっており、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。そのため、あるエリアに UDL だけで接続された Receiver 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ようになり、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。

しかし、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動作させるのが望ましい場合が多いと考えられる。例えば、バックボーンと地理的に遠く離れたネットワーク A があるとして、次のような場合はネットワーク A を別エリアとして動作させるのが望ましい。

- バックボーンとネットワーク A 間は衛星回線と狭帯域な地上回線で結ばれている。
- バックボーンとネットワーク A 間は片方向衛星回線のみで接続されている。
- ネットワーク A 内における経路の変動をバックボーンに伝えたくない。またはその逆をしたくない。

バックボーンと遠隔のネットワークを別エリアに設定したトポロジを図 5.16 に示す。

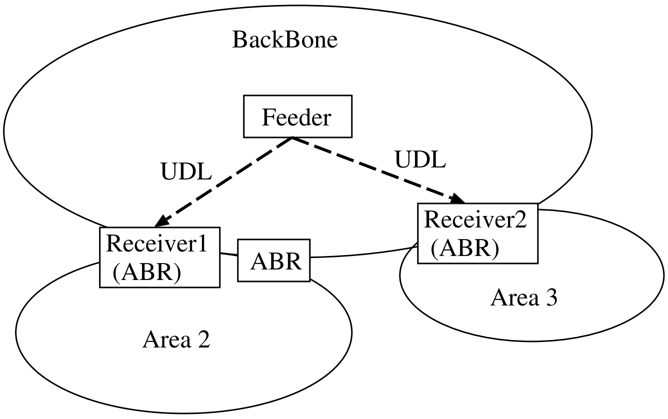

図 3.5: 遠隔ネットワークを一つのエリアに設定したトポロジ

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。

3.4 既存の拡張方法の適用

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 [17] を失わない
- 既存の OSPF の規模性 [16] を失わない

特定の通信媒体やネットワークトポロジで生じる問題を解決する場合、既存の OSPF の設計や実装を大きく変更するのは移行へのコストが高く利用しずらい。3.2.1 や 3.2.2 で述べたように、全てのルータに必要な変更点を最小限に留め、主な変更点は特定のルータに適用するのが望ましい。

本研究で対象とする問題点と Demand Circuit で対象とする問題点では、次の点が共通している。

- Hello プロトコルが要求に見合った動作をしない
- LSA の伝搬方式がネットワークトポロジに適合しない

したがって、本設計では Demand Circuit と同様に Hello プロトコルと UDL における LSA の伝搬方式に改変を加える必要がある。しかし、Demand Circuit による Hello プロトコルの改変は Demand Circuit を通る Hello パケットを抑制するのが目的なのに対し、本研究では片方向にしかデータが流れないリンクの状態をどのように検知するかが問題であり、改変の手法は大きく異なる。また、Demand Circuit では LSA の伝搬方式に対し、Demand Circuit を通る LSA の伝搬を抑制する改変を行っている。これに対し、本研究では衛星回線のように大規模なノードが接続するリンクにおいて効率的に LSA を同期させる手法を考案する。

NSSA の拡張手法は、特定のエリアだけに流れる LSA を定義し、特殊な LSA を用いて交換された経路を既存の OSPF が定義する LSA に変換して広告する。本研究では UDL に接続するノードがエリア間の経路制御を行う場合、これと同様の機構を用いる。UDL を経由したエリア間経路、AS 外部経路は UD Summary LSA、UD External LSA によって UDL 上のルータに広告される。これらの経路は通常の Summary LSA、External LSA によって他のルータに広告される。本機構の詳細は 5 章で述べる。また、本研究では Opaque LSA の定義に従って独自の LSA を定義する。

第4章　衛星回線を用いたネットワークの構築

本章では、衛星回線をインターネットで用いる場合に矛盾のないネットワークを構築するために必要な原則を述べる。また、様々なネットワークトポロジの分類を行い、これら全てのトポロジで共通するUDL上のノード間の接続性を定義する。

4.1　衛星回線の利用形態

衛星回線は、既存の地上回線に比べて回線設定が非常に柔軟である。衛星回線は電波を用いており、通常送信局ごとに個別の周波数帯を割り当てる。また、各送信局、受信局は周波数を切替えることにこにより全く別の回線として利用できる。

現在利用されている衛星回線のインタフェースは次の3種類である。

- 送受信インタフェース (ある周波数への送信、ある周波数からの受信が可能)
- 送信専用インタフェース (ある周波数への送信のみ)
- 受信専用インタフェース (ある周波数からの受信のみ)

4.2　ネットワーク構成の原則

インターネットにおいて衛星回線を用いる場合、矛盾のないネットワークを構築するため次の原則に従う必要がある。

- 一つのインタフェースは一つのサブネットに属する
- サブネット内では全ての送信インタフェースから全ての受信インタフェースまで到達性がある。

本稿では、衛星回線を用いた接続形態を次の4つにパターン分けし、これらのトポロジにおける各ルータのインタフェース構成とIPサブネットの構成を述べる。

- Simple UDL
- Point-to-Point リンク
- UDL メッシュリンク
- Complex UDL

4.3 Simple UDL

1.2 節で述べた理由から、衛星回線では送信装置よりも受信装置のほうが多くの場所で利用される。片方向にデータを配送することを目的とし、一つの周波数帯だけを使って構築したネットワークトポロジを Simple UDL と呼ぶ。Simple UDL は、通常一つの Feeder と複数の Receiver が接続する。衛星回線では送信局と受信局が地理的、数的な制限なしに直接接続できるため、Receiver の数はあらゆる規模が考えられる。Simple UDL トポロジでは、全てのノードが一つの IP サブネットを構成する。これを図 4.1 に示す。

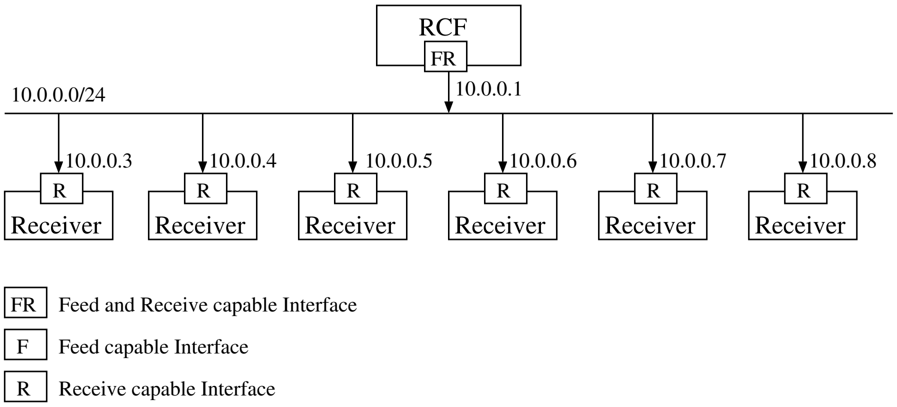

図 4.1: Simple UDL におけるルータのインタフェース構成とサブネット構成

4.4 Point-to-Point リンク

衛星回線は、地理的に離れた地点を双方向に直接接続するために利用されることも多い。RCF2 台を対向で接続した Point-to-Point リンクはその最も単純な構成である。Point-to-Point リンクでは二つの周波数帯が必要である。RCF は自分の送信周波数から送信を行い、相手先の送信周波数を受信する。これを図 4.2 に示す。

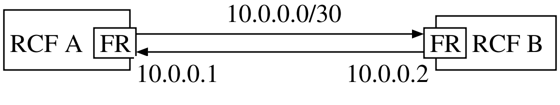

図 4.2: Point-to-Point リンクにおけるルータのインタフェース構成とサブネット構成

N 個の RCF が直接接続するためにフルメッシュで Point-to-Point リンクを用いた場合、N(N-1)/2 本のリンクが必要である。このために必要な周波数の数は N(N-1) である。この手法では接続する RCF が増えるに伴って必要なリンクの数が膨大になる。そこで、衛星回線を用いて多地点を双方向に接続する場合、ハブとなるサイトを構築し多数の RCF をスター型のトポロジで接続する手法が用いられる。その一例とし

て AI3(Asian Internet Interconnction Initiatives)[18] プロジェクトがあげられる。スター型の接続形態を図 4.3 に示す。それぞれの RCF 及びハブサイトにおける送信周波数、受信周波数を表 4.1 に示す。

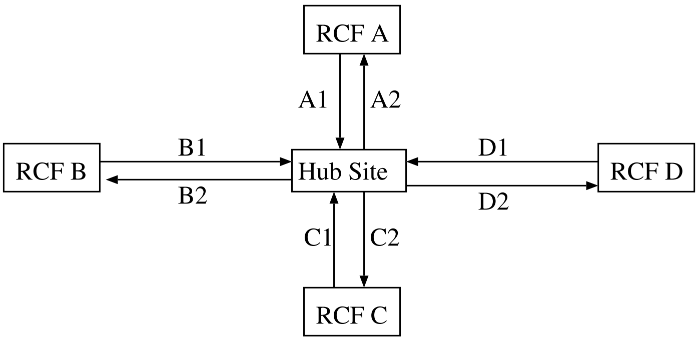

図 4.3: スター型トポロジ

RCF	送信周波数	受信周波数
A	A1	A2
B	B1	B2
C	C1	C2
D	D1	D2
Hub サイト	A2、B2、C2、D2	A1、B1、C1、D1

表 4.1: スター型トポロジにおける RCF の送信周波数、受信周波数

スター型のトポロジでは、Hub Site を除いた RCF 数 (N-1) の Point-to-Point リンクが必要であり、2(N-1) 個の周波数が必要である。スター型トポロジの問題点は、RCF 同士の通信が全てハブサイトを経由するため、リーフ RCF 同士ではホップ数が増える点である。衛星回線では、ホップ数が増えると遅延が大きく増加するため、実時間性を必要とするアプリケーションが快適に動作しない場合がある。

4.5 UDL メッシュ

多数の地点を双方向に接続する場合、UDL メッシュと呼ばれるトポロジを用いる手法 [13] が考えられている。RCF に複数の受信機能を持たせ、複数の周波数を受信できるようにしたノードを Multi-channel Receive Capable Feeder(以下 MCRCF) と呼ぶ。UDL メッシュトポロジでは、MCRCF 間にメッシュ型に UDL を設置し全てのノード間が双方向に送受信できる環境を構築する。これを図 4.4 に示す。各 MCRCF における送信周波数と受信周波数を表 4.2 に示す。

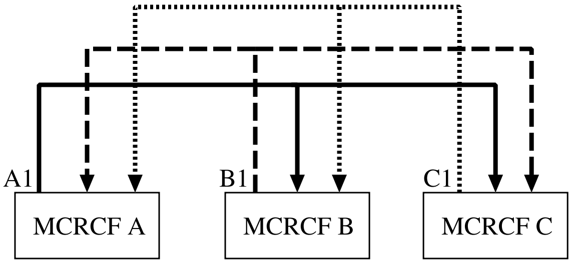

図 4.4: UDL メッシュトポロジ

MCRCF	送信周波数	受信周波数
A	A1	B1、C1
B	B1	A1、C1
C	C1	A1、B1

表 4.2: UDL メッシュトポロジにおける MCRCF の送信周波数、受信周波数

UDL メッシュトポロジは MCRCF を用いて構築する手法と、MCRCF に必要な機能を複数台のルータに分割する手法が考えられる。UDL メッシュトポロジでは接続地点の数だけ MCRCF に受信用インタフェースが必要であるため、接続地点が多い場合は複数台のルータに機能を分割する手法が簡単である。UDL メッシュリンクを構築するルータのインタフェース構成とサブネット構成を図 4.5 に示す。

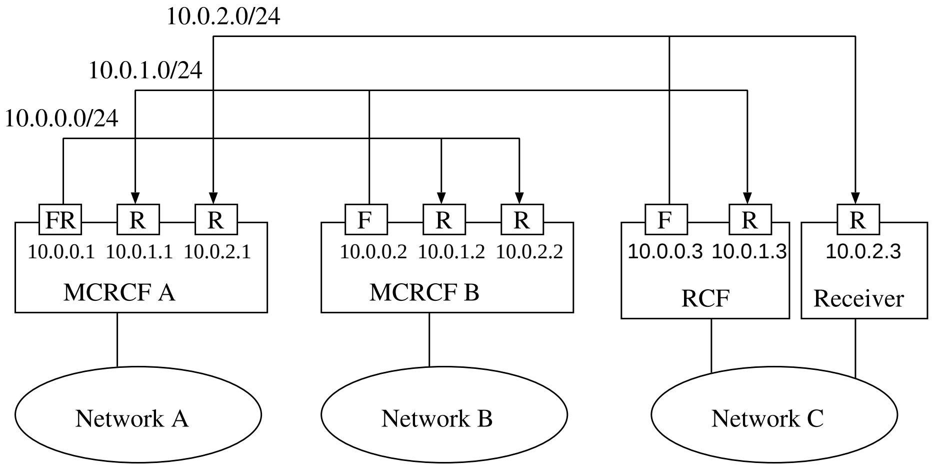

図 4.5: UDL メッシュリンクにおけるルータのインタフェース構成とサブネット構成

UDL メッシュリンクでは、ある周波数にデータを送信するインタフェースと、その周波数から電波を受信する受信インタフェースの組を一つのサブネットにする。MCRCF A は送受信インタフェースを持っているが、自分からの送信と他の MCRCF からの受信に同じインタフェースを使ってはならない。例えば、MCRCF A が送受信インタフェースに 10.0.0.1 と 10.0.1.1 の二つの IP アドレスを設定した場合、10.0.0.0/24 のサブネットには送信、10.0.1.0/24 のサブネットからは受信だけができる。しかし、MCRCF A の上位レイヤはインタフェース自体に送受信機能があることだけを認識し、送信能力と受信能力を論理的に別のインタフェースとして扱わない。4.2 で述べた原則の通り、必ず一つのインタフェースは一つのサブネットに属する必要がある。

N 個の MCRCF を用いた UDL メッシュトポロジでは、必要な周波数は N であり、全ての MCRCF 間は 1 ホップで到達できる。必要な回線数が少ないため、同一の周波数帯域幅を使った場合、他のトポロジに比べ各ノード間に割り当てられる周波数帯が広くとれる。また、MCRCF は N 個の周波数の受信能力が必要だが、衛星回線の受信専用装置は送信装置に比べて安価なため、ネットワークの構築においてコスト的に優れている。更に、ある MCRCF から複数の MCRCF に同一のデータを送信する場合、マルチキャストやブロードキャストが使えるメリットがある。N 個の地点を衛星回線で結ぶ場合、接続形態によって必要な周波数の数と衛星ルータ間の最大ホップ数を表 4.5 に示す。

トポロジ	周波数の数	最大ホップ数
Point-to-Point リンクのメッシュトポロジ	N(N-1)	1
スター型トポロジ	2(N-1)	2
UDL メッシュトポロジ	N	1

表 4.3: 各接続形態における周波数個数と最大ホップ数

4.6 Complex UDL

これまでに述べた通り、衛星回線は地上回線に比べて回線設定が非常に柔軟である。片方向の衛星回線を組み合わせて配置することで、これまでにない接続形態を実現できる。本節で述べた Simple UDL、Point-to-Point リンク、UDL メッシュ以外の接続形態を本項では Complex UDL と呼ぶ。

例えば、図 4.6 に示すトポロジでは RCF X と RCF Y は双方向の接続性がある。また RCF X の送信周波数だけを受信するノード (Receiver A)、RCF Y の送信周波数だけを受信するノード (Receiver C、D)、RCF X と RCF Y 両方の送信周波数を受信するノード (Receiver B) が存在している。

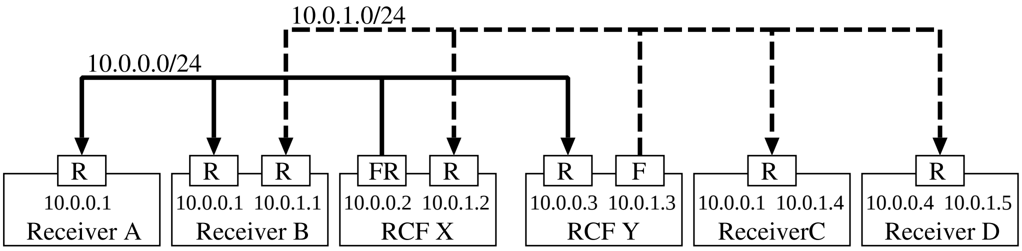

図 4.6: Complex UDL におけるルータのインタフェース構成とサブネット構成

Complex UDL ではある周波数帯にデータを送信するインタフェースと、その周波数帯から受信を行うインタフェースの組を一つのサブネットにする。RCF X は送受信インタフェース持つが、これを用いて両方のサブネットに接続することはできない。その理由は、受信目的で 10.0.1.0/24 のサブネットに接続した場合、RCF X の上位レイヤは 10.0.10.0/24 に接続するインタフェースは送受信能力を持つと認識してしまうからである。

図 4.6 のトポロジは二つの周波数帯によって 3 つの接続性を提供している。

- RCF X、Y 間の双方向の接続性
- RCF X から Receiver A、B への片方向接続
- RCF Y から Receiver B、C、D による片方向接続

これらの接続性を個別の回線で構築した場合を図 4.7 に示す。

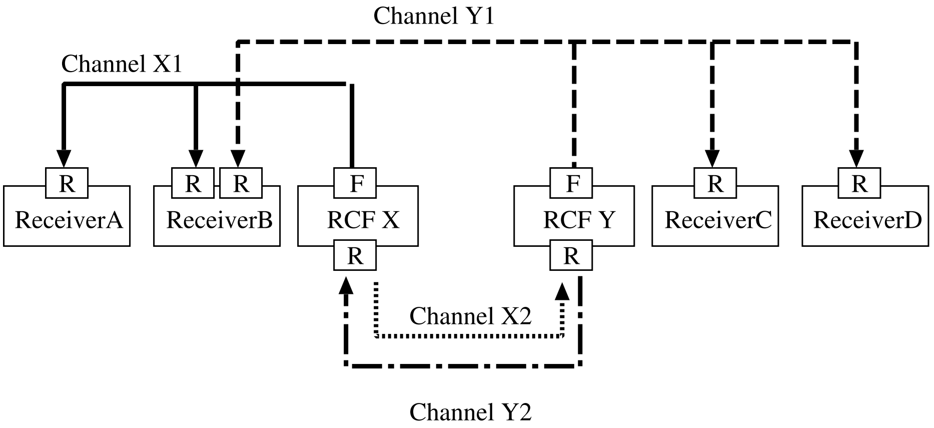

図 4.7: 個別の回線を用いた場合

図 4.7 のトポロジでは 4 つの周波数帯が必要であり、図 4.6 のトポロジに比べて周波数の割り当て効率

の面で劣っている。また、図 4.6 のトポロジでは各 RCF に送信インタフェースが二つ必要なのに対し、図 4.7 では送信インタフェースが一つでよいため機材のコスト的なメリットがある。

4.7 リンクレイヤ技術を用いた場合

4.2 で述べた原則は、様々なリンクレイヤ技術を用いた場合も適用できる。例えば、衛星ブリッジを用いて図 4.8 に示すトポロジを構築したとする。

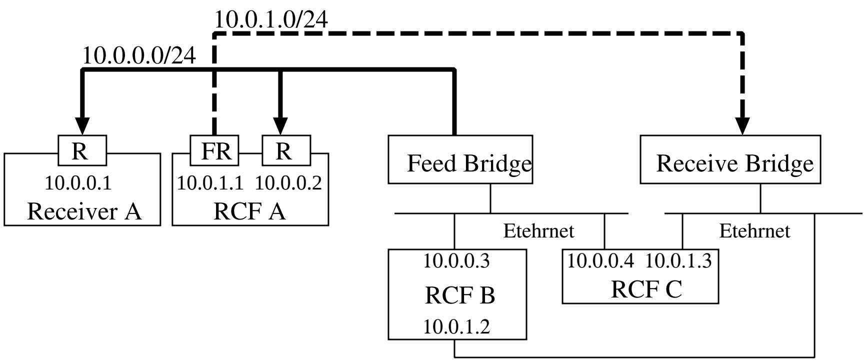

図 4.8: 衛星ブリッジを用いた場合における各ルータのインタフェース構成とサブネット構成

RCF B、C は Ethernet で接続されているため両方のサブネット内で双方向の通信ができる。しかし、10.0.1.0/24 サブネットでは RCF A から RCFB、C に送信だけが可能である。矛盾のないネットワークを構築するため、10.0.0.0/24 サブネットでは RCF A を SOF として動作させるか、または RCF B、C を Receiver として動作させる必要がある。

4.8 抽象化

本章で述べた通り、衛星回線では非常に多様なネットワークが構築できる。しかし、インターネットで衛星回線を用いる場合、ネットワークの最小単位はサブネットである。衛星回線はサブネットに切り離すことによって単純化できる。本項では、これまで RCF、SOF、Receiver、MCRCF の 4 種類のノードを定義した。実際には、各ルータが持つインタフェースの数や種類によって様々な能力を持つノードが構成できる。しかし、一つのサブネット上では次の 3 種類のノードだけが存在する。

- 送受信可能なノード
- 受信専用ノード
- 送信専用ノード

ここで、一つのサブネットにおけるノードの種類を RCF、SOF、Receiver と定義する。RCF はそのサブネットにおいて送受信可能なノード、SOF は送信だけができるノード、Receiver は受信だけができるノードである。4.2 で述べた原則に従い、これらのノード間には必ず表4.4 に示す接続性が存在する必要がある。

	RCF から受信	SOF から受信	Receiver から受信	RCF へ送信	SOF へ送信	Reciver へ送信
RCF	○	○	×	○	×	○
SOF	×	×	×	○	×	○
Receiver	○	○	×	×	×	×

表 4.4: 各ノード間の接続性

第5章　設計

本章では、UDL を含むネットワークにおいて OSPF が動作するための拡張機構を述べる。

5.1　本設計の概要

本研究では、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。設計は次のように大別される。

- 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

エリア内の経路制御とは、Router LSA と Network LSA をフラッディングし、それらの情報を元に各ルータで完全な Shortest Path Tree を計算することである。OSPF では、エリア内の全てのルータが同一の LSDB を保持し、SPF アルゴリズムに基づく同一の計算方法を用いることでループのない経路制御を実現している。本設計では、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。

エリア間の経路制御は、エリア境界ルータ (ABR) がエリア内の到達性情報を別エリアに広告しトラフィックを中継する。エリア間の到達性情報は Type3 Summary LSA で広告する。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 または 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。

AS 外部経路は AS 境界ルータ (ASBR) が External LSA によって広告する。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。

5.2　エリア内経路制御

5.2.1　エリアの定義

OSPF 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互いに接続性がある”と定義している。例えば、ネットワークに障害が生じエリアが分断された場合、それらは別のエリアとして動作する。本設計では、”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”と定義する。例えば、あるエリアの一部が UDL により他の部分から片方向にだけ接続されている場合、それらは別個のエリアとする。例えば、図 5.1 のトポロジでは Receiver とルータ A が一つのエリアを形成する。また、RCF とルータ B が一つのエリアを形成する。

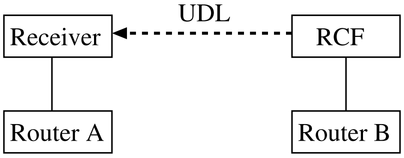

図 5.1: エリアの形成 (1)

あるエリアの一部が複数の UDL により他の部分と双方向に接続されている場合も、それらは別個のエリアとする。例えば、図 5.2 のトポロジでは、ReceiverA とルータ A と RCFA が一つのエリアを形成し、残りのルータがもう一つのエリアを形成する。

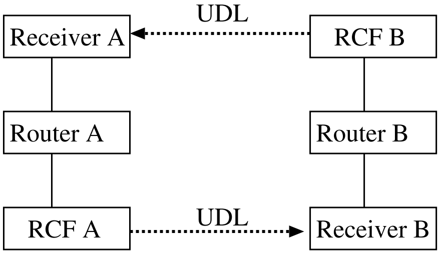

図 5.2: エリアの形成 (2)

5.2.2　解決すべき問題点

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

2、3 の問題は相互に関連した問題である。UDL 上のノードがどのような LSA を作成し、どのようにフラッディングするかによって、Shortest Path Tree の適切な計算手法を定義する必要がある。しかし、Shortest Path Tree の計算手法を変更すると、全ての OSPF ルータを同一の計算手法に変更する必要がある。本研究では既存の OSPF ルータと互換性保つことを設計方針とするため、既存の計算手法に変更を加えない解決法を考案する。

5.2.3 既存の経路計算機構との互換性

既存の経路計算機構は次の規定を含んでいる。

- Shortest Path Tree の計算において、あるノードから別のノードへのリンクをツリーに追加する場合、リンク先のノードから元のノードへ逆向きのリンクが広告されている必要がある。

これは BDL しか存在しないネットワークにおいて Shortest Path Tree の整合性を高める規定である。UDL を含むネットワークでは、本来 RCF や SOF などの送信機能を持つノードから RCF や Receiver への受信機能を持つノードへの接続性だけが存在する。しかし、この規定を持つ OSPF ルータと互換性を保つため、受信機能を持つノードから送信機能を持つノードへのリンクが広告される必要がある。この時、受信機能を持つノードから送信機能を持つノードへのリンクが Shortest Path Tree に含まれない保証が必要である。2.2.2 で述べたように、トンネリングを用いた既存の解決手法ではこの保証がない。そのため、トポロジによって受信機能を持つノードから送信機能を持つノードへのリンクが経路に組み込まれる問題が生じる。

この問題の解決法として、LSA で広告するリンクの種類に” 片方向に通過できるリンク” を追加することが考えられる。例えば、次の規定によってリンク情報を正しい向きにだけ計算できる。

- あるリンクをツリーに加える場合、同じ種類のリンクか “片方向に通過できるリンク” がリンク先のノードから広告されていることを確認する。
- “片方向に通過できるリンク” は Shortest Path Tree に加えない。

しかし、OSPF においてリンクの種類を増やす場合、全てのルータに改変を加えそのリンク情報を扱う機能を追加する必要がある。したがって、新しい経路制御プロトコルや既存の OSPF ルータと互換性がない機構を設計する場合は有効な手法だが、本研究の設計方針と合致しない。

5.2.4 本研究の解決法

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 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 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。

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 を選出する。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。Receiver 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。

例えば、図 5.3 に示すネットワークを一つの OSPF エリアとする。

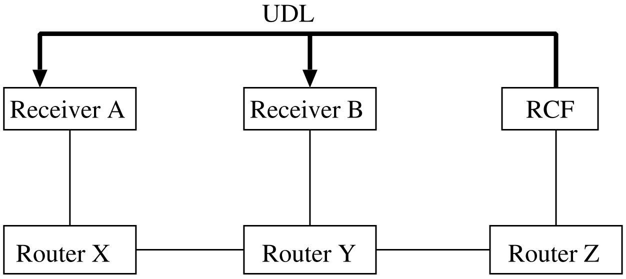

図 5.3: エリア内の全てのルータが同一の LSDB を保持するトポロジ

このように、エリア内では全てのルータが BDL で相互に接続されており、BDL 上で LSDB が同期されることで全てのルータが同一の LSDB を保持できる。例えば、RCF はルータ Z と LSDB を同期させ、ルータ Z はルータ Y と同期させ、ルータ Y は Receiver B と同期させるため、RCF と Receiver B は同一の LSDB を保持する。このため、エリア内の全てのルータで同じトポロジが計算できると保証される。このようなトポロジでは Receiver A、B を経由し UDL を通過する経路は Shortest Path Tree に含まれない。その理由は、BDL を利用して LSDB の同期がとれるルータ間では必ず BDL による経路が存在し、この経路のコストが Receiver における UDL のコストより高くなることはないからである。逆に、RCF を経由し UDL を通過するリンクは適切なコストで広告されるため、BDL と UDL の区別なく単純にコストを比較し選択される。

5.2.5 SOF からの接続性

上記の手法では、SOF から RCF および Receiver への接続性を広告していない。その理由は、RCF 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、RCF から SOF へ到達性があると計算されてしまうからである。そこで、SOF が存在するトポロジでは、SOF 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。例えば、RCF1 と SOF1 が存在する UDL(図 5.4) では 2 つの Network LSA が作成される。

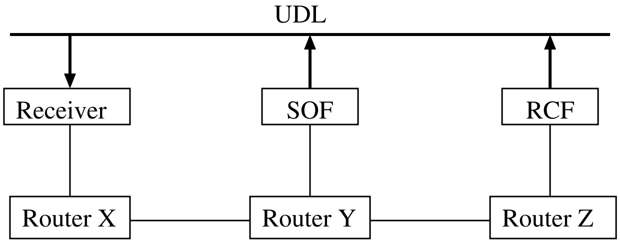

図 5.4: RCF と SOF が存在するトポロジ

Network LSA は Attached Router フィールドに作成元のルータと 2-Way 以上の関係を持つルータのルータ ID を含む。図 5.4 のトポロジで作成される Network LSA の Link State ID フィールドと Attached Router フィールドの値を表 5.1 に示す。

作成ルータ	Link State ID	Attached Router
RCF	RCF の UDL インタフェースの IP アドレス	RCF、Receiver
SOF	SOF の UDL インタフェースの IP アドレス	SOF、RCF、Receiver

表 5.1: Network LSA 内の情報

RCF が作成するルータ LSA は、RCF の中から選出された DR が作成した Network LSA と全ての SOF が作成した Network LSA へのリンクを広告する。SOF が作成するルータ LSA は、自分自身が作成した Network LSA へのリンクだけを広告する。Receiver が作成するルータ LSA は、RCF の中から選出された DR が作成した Network LSA と全ての SOF が作成した Network LSA へのリンクを広告する。

RCF から UDL 上のノードへの接続性と、各 SOF から UDL 上のノードへの接続性を別個に扱うことにより、UDL 上の全てのノード間の接続性が正しくエリア内に広告される。これを図 5.5 に示す。

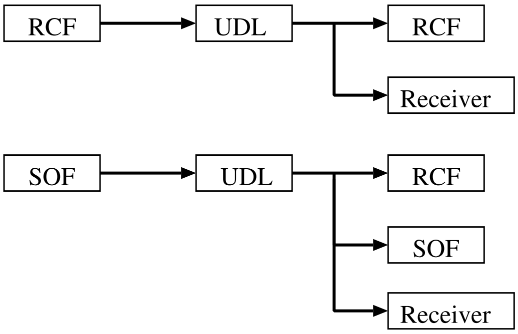

図 5.5: UDL 上の接続性を別個に広告する

5.3 UDL の状態検知

5.3.1 UDL Hello

UDL における各ノード間の接続性を監視するため、UDL Hello プロトコルを用いる。UDL Hello は、OSPF の Hello プロトコル (以下 Hello と呼ぶ) を UDL 上で動作するように変更したものである。UDL Hello が通常の Hello と異なる点を次に示す。

- Hello メッセージでノードのタイプ (RCF、SOF、Receiver) を広告する。
- RCF、SOF から送信される Hello Message は Return Address が含まれており、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。

UDL Hello のパケットフォーマットを図 5.6 に示す。網かけ部分が通常の Hello パケットに追加したフィールドである。

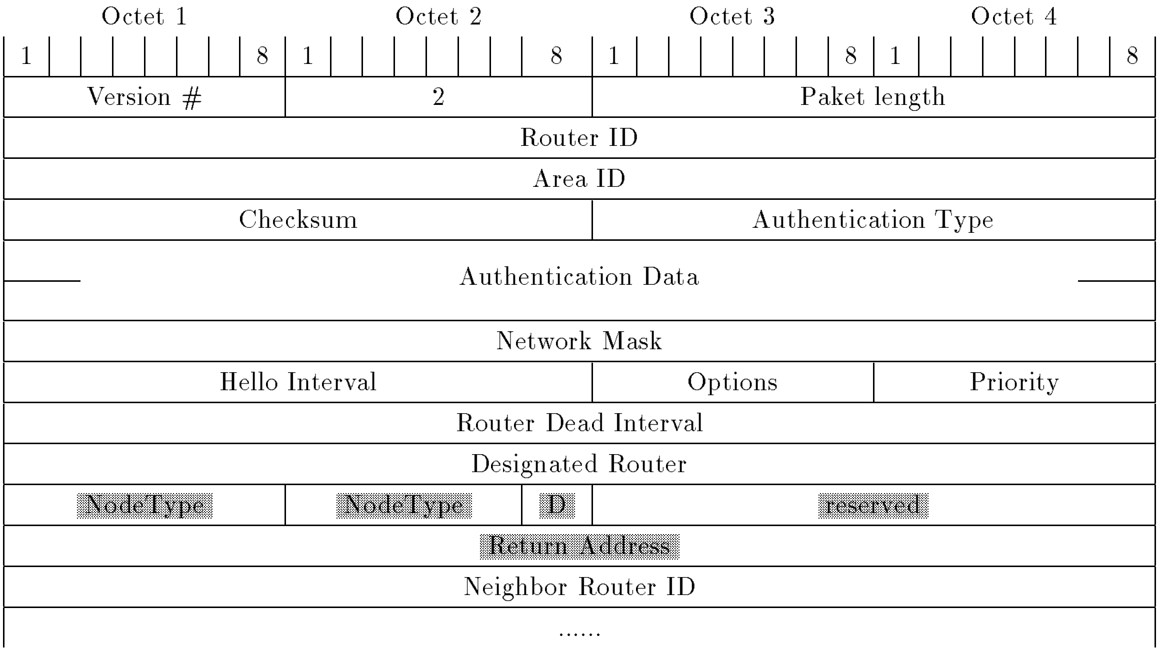

図 5.6: UDL_Hello のパケットフォーマット

NodeType: Hello パケットを送信したノードの種類

Return Address: Hello パケットを送信したノードの種類によって値が異なる。

UDL Hello で監視する接続性は次の通りである。

- RCF 間における双方向の接続性
- RCF から Receiver への片方向の接続性

- SOF から Receiver への片方向の接続性
- SOF から RCF への片方向の接続性

RCF および SOF は一定時間ごとに UDL 上に UDL Hello を送信する。同時に、Return Address フィールドにおいて UDL Hello を受け取るための IP アドレスを指定する。UDL Hello を受信したノードは NodeType フィールドから送信元ノードの種類を判別する。次の UDL Hello は UDL 上に直接送信する代わりにユニキャストで送信する。

- RCF から SOF へ
- Receiver から RCF へ
- Receiver から SOF へ

ユニキャストで送信する UDL Hello には、Return Address フィールドに UDL インタフェースの IP アドレスを設定する。これにより、UDL Hello を受信したノードは UDL 上のどの隣接ルータから送信されたパケットか判別する。

Nodetype フィールドと Return Address フィールドの値を表 5.2 に示す

ノードの種類	NodeType	Return Address
RCF	1	Receiver から Hello を受け取るための IP アドレス SOF に送信する場合、UDL インタフェースの IP アドレス
SOF	2	RCF、Receiver から Hello を受け取るための IP アドレス
Receiver	3	UDL インタフェースの IP アドレス

表 5.2: Nodetype フィールドと Return Address フィールドの値

5.3.2 RCF における動作手順とルータの状態遷移

RCF は、一定時間おきに UDL において OSPF_ALLSPFROUTERS マルチキャストアドレス宛に UDL Hello を送信する。NodeType フィールドは 1 を設定し、Return Address フィールドには Receiver から UDL Hello を受け取る IP アドレスを設定する。

RCF から UDL Hello を受け取ったルータは、自分自身が RCF の場合、通常の Hello プロトコルと同じ動作をする。送信元のルータ ID を Neighbor ID フィールドに追加し、UDL 上に送信する。また、DR と BDR の選出を行う。SOF の場合、送信元のルータ ID を Neighbor ID フィールドに追加し UDL 上に送信するが、DR と BDR の選出は行わない。Receiver の場合、送信元のルータ ID を Neighbor ID フィールドに追加し Return Address 宛にユニキャストで送信する。

RCF は UDL 上かユニキャストで UDL Hello を受信し、Neighbor ID フィールドに自分のルータ ID が含まれていた場合 2-Way 状態に遷移する。Neighbor ID フィールドに自分のルータ ID が含まれてない場合 1-Way 状態に遷移する。

5.3.3 SOFにおける動作手順とルータの状態遷移

SOFは、一定時間毎にUDLにおいてOSPF_ALLSPFROUTERSマルチキャストアドレス宛にUDL Helloを送信する。NodeTypeフィールドは2を設定し、Return Addressフィールドには RCF及びReceiverからUDL Helloを受け取るIPアドレスを設定する。

RCFおよびReceiverは、SOFからUDL Helloを受信するとSOFのReturn Address宛にユニキャストでUDL Helloを送信する。SOFはUDL上で受信能力がないためSOFからUD Helloを受信することはない。もしも、SOFからUDL Helloを受け取った場合は破棄する。SOFは常にユニキャストでUDL Helloを受信し、Neighbor IDフィールドに自分のルータIDが含まれていた場合2-Way状態に遷移する。Neighbor IDフィールドに自分のルータIDが含まれてない場合1-Way状態に遷移する。SOFはUDL上でDRとBDRの選出を行わない。Designated Routerフィールドに自分自身のルータIDを挿入し、自分自身をDRに指定する。

5.3.4 Receiverにおける動作手順とルータの状態遷移

Receiverは、ROFまたはSOFからUD Helloを受信すると一定時間おきにReturn Address宛にUD Helloを送信始める。NodeTypeフィールドは3を設定し、Return Addressフィールドは UDL上のIPアドレスを設定する。ReceiverはUDL上のOSPF_ALLSPFROUTERSマルチキャストアドレスからUDL Helloを受信し、Neighbor IDフィールドに自分のルータIDが含まれていた場合2-Way状態に遷移する。Neighbor IDフィールドに自分のルータIDが含まれてない場合1-Way状態に遷移する。Receiver同士はUDL Helloの交換を行わない。もし他のReceiverからUDL Helloパケットを受信した場合は破棄する。

5.4 LSAの作成

本節では、UDL上のノードが作成するRouter LSAとNetwork LSAの詳細を述べる。

5.4.1 Network LSA

本設計では、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。OSPFではマルチアクセスネットワークはNetwork LSAによって広告され、一つのノードとして考えられる。Network LSAは各ネットワークで選出されるDRが作成するため、一つのマルチアクセスネットワークで作成されるNetwork LSAは一つである。また、OSPFでは各ルータからNetwork LSAへのリンクはコストを設定できるが、Network LSAから各ルータへのコストは設定できない。既存のOSPFでは、マルチアクセスネットワークの接続性を図5.7のように表現する。

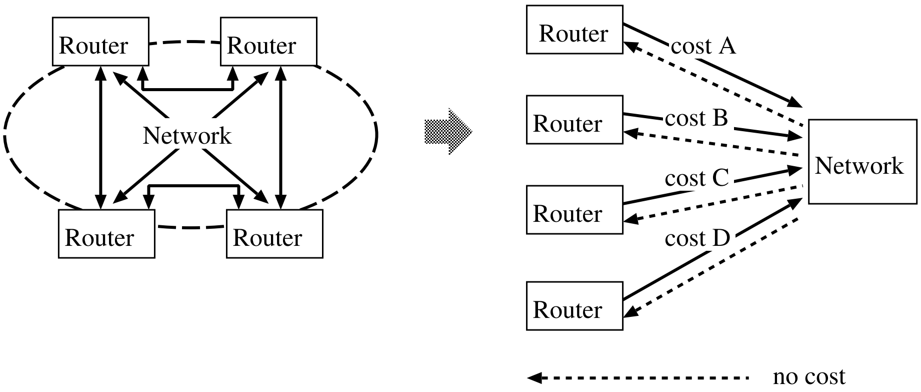

図 5.7: マルチアクセスネットワークをノードとして扱う

しかし、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。これを図 5.8 に示す。

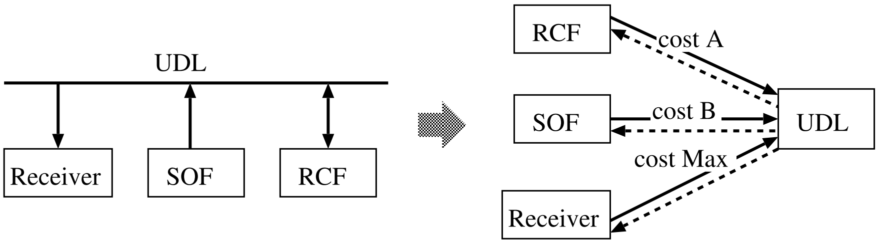

図 5.8: UDL ネットワークをノードとして扱った場合

SOF から RCF および Receiver への接続性を計算するには Network LSA の Attached Router フィールドに SOF のルータ ID を含める必要がある。しかし、図 5.8 に示す通り、SOF と UDL の Network LSA との接続性を広告すると、RCF や他の SOF から UDL を経由して SOF に到達できると計算されてしまう。

本研究では、既存の OSPF における次の設計を利用し UDL 上における正確な接続性を広告する。

- Network LSA は Link State ID フィールドで識別される。
- Link State ID は Network LSA を作成したルータのインタフェースの IP アドレスである。
- 一つのマルチアクセスネットワーク内で複数のルータが Network LSA を作成すると、Link State ID が異なるため、それらは Shortest Path Tree の計算の中で別々のノードとして扱われる。

このように、あるマルチアクセスネットワークを経由したルータ間の接続性は、複数の Network LSA を作成することで分割して広告できる。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数分のNetwork LSAが作成される。これを図5.9に示す。

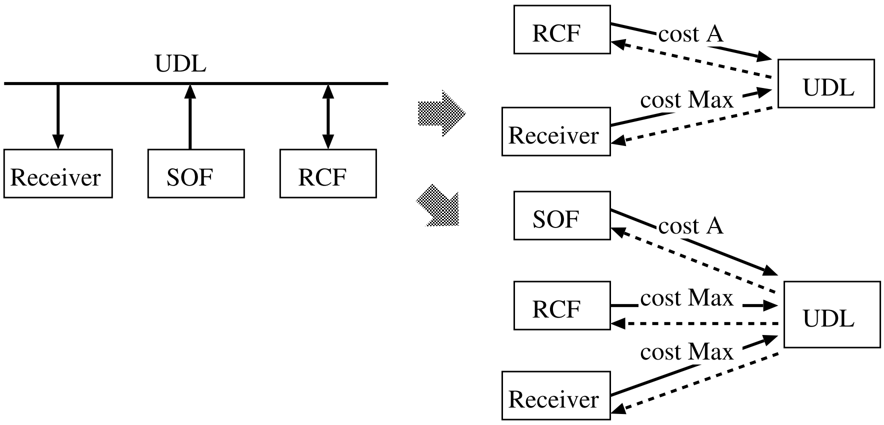

図5.9: SOFからの接続性を個別のNetwork LSAで広告

5.4.2 Router LSA

Router LSAでは、DRおよびSOFが作成したNetwork LSAと接続する“通過できるマルチアクセスネットワークへのリンク”を広告する。RCFやSOFは管理者が設定したコストによってこのリンクを広告するが、Receiverは必ずコストを最大に設定して広告する。また、RCFにおいてSOFが作成したNetwork LSAへの接続を広告する場合もコストを最大に設定する。これは、エリア内部の経路が計算される場合にReceiverからRCF、ReceiverからSOF、RCFからSOFといった誤った経路が選択されないためである。

Router LSAにおいてリンクを広告するLink Informationフィールドを図5.10に示す。

<table>
<tr><td colspan="8">Octet 1</td><td colspan="8">Octet 2</td><td colspan="8">Octet 3</td><td colspan="8">Octet 4</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td></tr>
<tr><td colspan="32">Link ID</td></tr>
<tr><td colspan="32">Link Data</td></tr>
<tr><td colspan="8">Link Type</td><td colspan="8"># TOS</td><td colspan="16">TOS(0) metric</td></tr>
<tr><td colspan="8">TOS</td><td colspan="8">0</td><td colspan="16">metric</td></tr>
</table>

図5.10: Link Infomation

Link ID、Link Dataフィールドの値はリンクの種類によって個別の意味を持つ。マルチアクセスネットワークへのリンクでは、次の値になる。

Link ID: DRのIPアドレス

Link Data:　インタフェースのIPアドレス

SOFが作成したNetwork LSAへのリンクでは、DRのIPアドレスはSOFのIPアドレスである。

5.5　エリア内経路計算の例

本節では、本設計を用いたエリア内の経路計算の具体例を述べる。図5.11のネットワークトポロジを例とする。数字は各ルータが広告するリンクコストである。

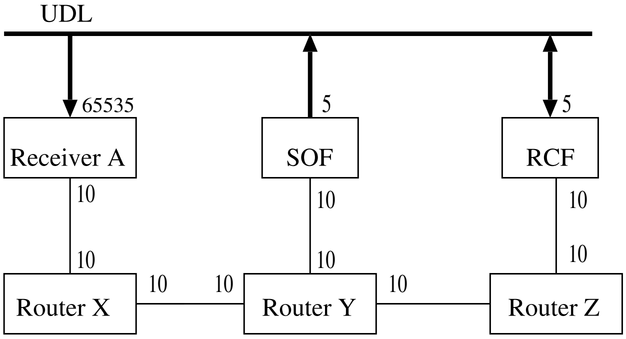

図5.11: RCFとSOFが存在するトポロジ

RCFは自分よりもpriorityが高いRCFが存在しないため、DRに選出されUDL上のNetwork LSAを作成する。SOFは他のDRの存在と関係なくNetwork LSAを作成する。エリア内のルータはBDL上でLSDBを同期させ、同じLSDBを保持する。図5.11のトポロジでは、LSDBに次のLSAが含まれる。

- RCFのRouter LSA(次のLink Informationを含む)
  - RCFが作成したUDLのNetwork LSAと接続する"通過できるマルチアクセスネットワーク"へのリンク(コスト5)
  - SOFが作成したUDLのNetwork LSAと接続する"通過できるマルチアクセスネットワーク"へのリンク(コスト最大)
  - ルータZと接続するPoint-to-Pointリンク(コスト10)
- SOFのRouter LSA(次のLink Informationを含む)
  - SOFが作成したUDLのNetwork LSAと接続する"通過できるマルチアクセスネットワーク"へのリンク(コスト5)
  - ルータYと接続するPoint-to-Pointリンク(コスト10)
- ReceiverのRouter LSA(次のLink Informationを含む)

  - RCF が作成した UDL の Network LSA と接続する” 通過できるマルチアクセスネットワーク” へのリンク (コスト最大)
  - SOF が作成した UDL の Network LSA と接続する” 通過できるマルチアクセスネットワーク” へのリンク (コスト最大)
  - ルータ X と接続する Point-to-Point リンク (コスト 10)

- UDL の Network LSA(RCF が作成し、Attached Router フィールドに次のルータ ID を含む)
  - RCF
  - Receiver
- UDL の Network LSA(SOF が作成し、Attached Router フィールドに次のルータ ID を含む)
  - RCF
  - SOF
  - Receiver

OSPF ルータは、LSDB の情報を元に自分自身を根とする Shortest Path Tree を作成する。全てのノードの中で最小のコストで到達できるノードを確定し、全ノードを順次ツリーに加えていく。例として、ルータ Y とルータ Z で計算される Shortest Path Tree を図 5.12 に示す。

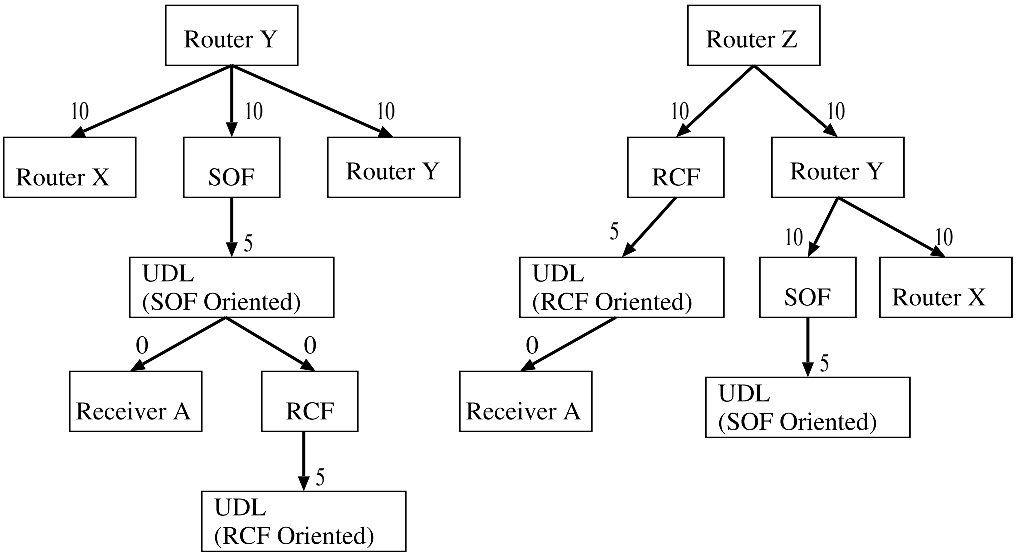

図 5.12: ルータ Y、ルータ Z で計算される Shortest Path Tree

ルータ Y は自分自身を根とし、根から最も近いコストで到達できるルータ X、SOF、ルータ Y をツリーに加える。この時、ツリーに参加するノードが持つリンクを経由し、根から最小コストで到達できるノー

ドはSOF が作成したUDL のNetwork LSA である。したがってY はこれをツリーに加える。SOF が作成したNetwork LSA は新たにReceiver A、RCF への接続を広告しており、ルータY はReceiver A とRCF をツリーに加える。OSPF ではルータからネットワークへのコストは計算されるが、ネットワークが頂点の場合はネットワークから各接続ノードへのコストは計算されない。したがってSOF からReceiverA、RCF へのコストは5 である。最後に、RCF が作成したUDL のNetwork LSA をツリーに加える。RCF が作成したNetwork LSA とSOF が作成したNetwork LSA はノードとして別個に扱うが、ネットワークアドレスそのものは同一である。そのため、Shortest Path Tree から経路表を作成する際は、根からより近いNetwork LSA へ経路を設定する。

ルータZ は自分自身を根とし、根から最も近いコストで到達できるRCF とルータY をツリーに加える。次に、RCF が作成したUDL のNetwork LSA をツリーに加える。RCF が作成したNetwork LSA では新たにReceiver A への接続が広告されており、Receiver A をツリーに加える。次に最小コストで到達できるノードはルータY を経由したSOF とルータX である。最後に、SOF を経由しSOF が作成したUDL のNetwork LSA をツリーに加える。ルータY の経路計算と同様に、UDL への経路は根からより近いNetwork LSA への経路を設定する。

5.6 エリア分断時の動作

5.6.1 エリアが分断されたトポロジ

OSPF では、Hello プロトコルによってリンクの状態を監視し、ネットワークに障害が生じた場合即座にLSDB を更新する。あるリンクが不通になった場合、そのリンクに接続していたルータは新しいLSA を作成し、全てのルータは新しいShortest Path Tree を計算する。

本機構を用いる場合も、ネットワークトポロジに変化があった場合、それを正確にLSDB に反映し新しいShortest Path Tree を計算できる保証が必要である。例えば、図5.3 のトポロジにおいて、ルータX とルータY 間のリンクがダウンしたとする。これを図5.13 に示す。

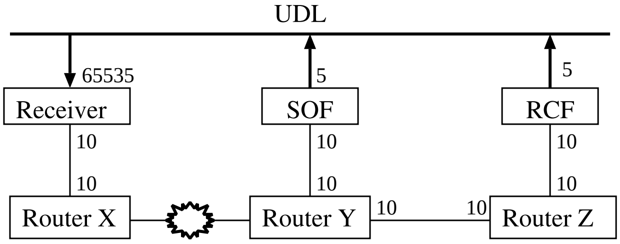

図5.13: エリアが分断されたトポロジ

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。したがって、このトポロジはエリアが分割されており、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。RCF から SOF への UDL Hello は UDL を経由して Receiver に送信される。また、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。Receiver から RCF や SOF への UDL Hello がエリア外の経路によって宛先に到達した場合、UDL は使用できる状態だと判断される。この時、Receiver やルータ X 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。その理由は、エリア内に BDL による接続性がなくなったため、コストを最大に設定した Receiver から UDL への経路が他のルータに到達する唯一の経路だからである。

5.6.2 D-bit オプション

この問題を解決するため、本機構では UDL Hello に次の規定を追加する。

- Receiver が UDL Hello を送信する場合、または RCF が SOF に UDL Hello を送信する場合、UDL Hello を送信するための経路がエリア内にない場合、UDL Options フィールドの D-bit を 1 に設定する。また、ルータ LSA において UDL に対する" 通過できるマルチアクセスネットワークへのリンク" を広告しない。
- D-bit が 1 に設定された UDL Hello を受信した RCF と SOF は、Network LSA を作成する際にその隣接ルータを Attached Router フィールドに含めない。

この機構により、5.13 のトポロジにおいて、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。RCF、SOF へ送信する UDL Hello に D-bit を設定し、UDL へのリンクを含まない新しいルータ LSA を作成する。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 Attached Router フィールドに Receiver のルータ ID を含まない新しい Network LSA を作成する。また、Receiver からの UDL Hello を受信した場合も、D-bit が設定されているため同様の動作をする。

Receiver とルータ X の LSDB では、Receiver のルータ LSA が即座に更新される。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。また、残りのルータ (RCF、SOF、ルータ Y、ルータ Z) の LSDB では UDL の Network LSA が即座に更新される。このため、Shortest Path Tree の作成の中で Receiver を経由した経路を計算しない。例として、ルータ X とルータ Y が計算する Shortest Path Tree を図 5.14 に示す。

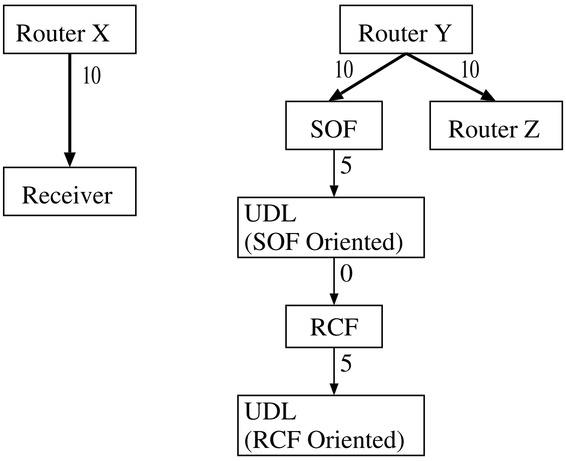

図 5.14: ルータ X、ルータ Y で計算される Shortest Path Tree

UDL 上では LSDB の同期が行われないため、Receiver とルータ X において RCF、SOF、ルータ Y、ルータ Z が作成した LSA は MaxAge を迎え捨てられる。また、残りのルータ (RCF、SOF、ルータ Y、ルータ Z) において Rceiver とルータ X が作成した LSA も MaxAge を迎え捨てられる。これらの LSA はエリア分断時より Shortest Path Tree に加わっておらず、作成される経路表は変化しない。

5.7 エリア間ルーティング

5.7.1 既存のエリア間ルーティング

OSPF のエリア間ルーティングは、距離ベクトル型のアルゴリズムに基づいている。ABR はエリア内のネットワークプレフィクスを別エリアに広告しエリア間のトラフィックを中継する。しかし、距離ベクトル型アルゴリズムはループが生じやすい問題点がある。これを防ぐため、OSPF では通常エリア間のトラフィックを中継できるのはバックボーンエリアだけと規定している。通常のエリアに広告される Type 3 Summary LSA は、バックボーンとバックボーンを経由して到達できる全てのエリアのネットワークプレフィクスを広告する。バックボーンに広告される Type 3 Summary LSA は、あるエリア内のネットワークプレフィクスだけを広告する。これを図 5.15 に示す。

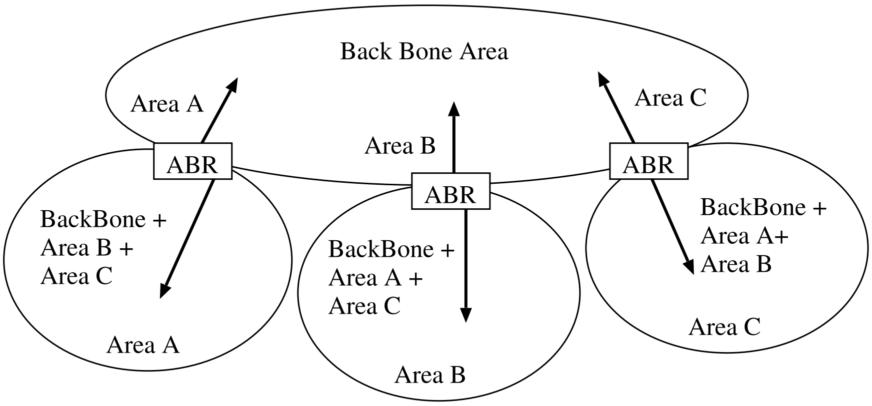

図 5.15: Summary LSA によるエリア間の経路広告

5.7.2 UD Summary LSA

UDL 上では RCF 以外のノードは直接 LSDB を同期させないことを 5.9 節で述べた。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 5.16 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。Receiver はバックボーン内の経路を持たないため、バックボーンエリア内やエリア 3 のネットワークプレフィクスをエリア 2 に広告しない。しかし、バックボーンエリアからエリア 2 へのトラフィックを中継するためには、バックボーンに対しエリア 2 内のネットワークプレフィクスを広告する必要がある。

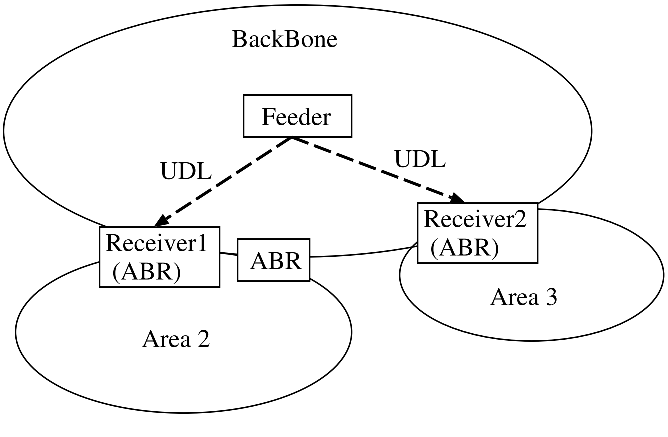

図 5.16: Receiver がエリア内のネットワークプレフィクスを他のエリアに広告する必要があるトポロジ

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。つまり、UD Summary LSA は次のノード間で同期させる。

- Receiver と RCF から選出された DR
- SOF と RCF
- Receiver と SOF
- RCF と RCF から選出された DR、BDR

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。

UD Summary LSA(Type 12、13) のフォーマットを図 5.17 に示す。Summary LSA のフォーマットと異なる点は、B-bit フィールドが追加された点である。B-bit は UD Summary LSA がバックボーンエリア内の経路情報を元に作成されたことを示す。

<table>
<tr><td colspan="8">Octet 1</td><td colspan="8">Octet 2</td><td colspan="8">Octet 3</td><td colspan="8">Octet 4</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>8</td></tr>
<tr><td colspan="16">LS age</td><td colspan="8">Options</td><td colspan="8">12 or 13</td></tr>
<tr><td colspan="32">Link State ID</td></tr>
<tr><td colspan="32">Advertising Router</td></tr>
<tr><td colspan="32">LS sequence number</td></tr>
<tr><td colspan="16">LS checksum</td><td colspan="16">length</td></tr>
<tr><td colspan="32">Network Mask</td></tr>
<tr><td>B</td><td colspan="7">0</td><td colspan="24">metric</td></tr>
<tr><td colspan="8">TOS</td><td colspan="24">TOS metric</td></tr>
<tr><td colspan="32">......</td></tr>
</table>

図 5.17: UD Summary LSA のフォーマット

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。この時、Summary LSA で広告するネットワークプレフィクスへのコストは UD Summary LSA が広告するコストに UDL リンクのコストを足したものである。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。

5.7.3 UD Summary LSA を用いたエリア間の経路制御の例

Type 12 UD Summary LSA を用いたエリア間の経路制御の例を図 5.18 に示す。

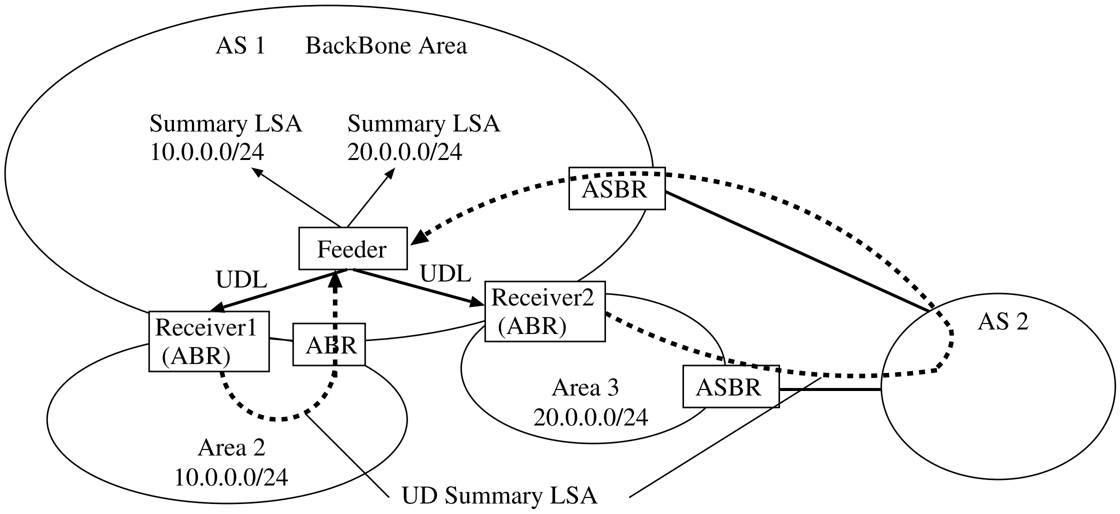

図 5.18: Type 12 UD Summary LSA によるエリア間の経路制御

エリア 2 は Receiver1 と ABR によってバックボーンと接続されている。ABR は両方のエリアに BDL リンクを持っている。ABR を経由してバックボーンとエリア 2 間の通信ができるので、この経路により Receiver1 と RCF との間で Type 12 UD Summary LSA を同期させる。Receiver1 はエリア 2 内のネットワークプレフィクス (10.0.0.0/24) を Type 12 UD Summary LSA で広告する。RCF は Summary LSA を作成し、このネットワークプレフィクスへの到達性をバックボーンエリアに広告する。バックボーンエリアのルータは、10.0.0.0/24 への経路を計算する場合、UDL を経由する経路と ABR を経由する経路を比較する。RCF が作成した Summary LSA は、10.0.0.0/24 へのコストを”UD Summary LSA で広告されたコスト+UDL インタフェースのコスト” で広告している。したがって、バックボーンエリアのルータは 2 つの経路を次のコストで比較する。

- UDL を経由する経路
  RCF までのコスト + UDL のコスト + Receiver1 から 10.0.0.0/24 までのコスト
- ABR を経由する経路
  ABR までのコスト + ABR から 10.0.0.0/24 までのコスト

このように、RCF が Type 3 Summary LSA に UDL のコストを足すことにより、バックボーンエリア内のルータがエリア 2 までの最短経路を正確に計算できる。

エリア 3 はバックボーンと Receiver2 だけで接続している。このため、AS 内からデータの受信だけが行えるネットワークである。図 5.18 のトポロジでは、エリア 3 は外部 AS を経由して自 AS 内にパケットを送信できるとする。Receiver2 は Type 12 UD Summary LSA によってエリア 3 内のネットワークプレフィ

クス (20.0.0.0/24) を広告する。RCF は Type 3 Summary LSA を作成し、その内容をバックボーンエリアに広告する。これにより、AS1 内において UDL を経由し 20.0.0.0/24 のネットワークにトラフィックを中継できる。

外部 AS を経由した経路

同一 AS 間のトラフィックが外部 AS を経由する手法は 2 種類考えられる。

- BGP による partition healing
- ルータが他 AS とマルチホームする

BGP4[14][15] では、AS-PATH 属性にローカルの AS 番号が含まれていた場合、そのプレフィクスを拒否するか受け入れるか規定されていない。BGP のいくつかの実装では設定次第で冗長な経路を受け入れることができる。例えば、ある AS が内部で二つのネットワークに分かれた場合、それらのネットワーク間でそれぞれ外部 AS と接続し、AS 外部の経路によって互いの接続性を保つことを BGP の partiton healing と呼ぶ。AS が分割された場合、分割された区分同士が通信するためには次の動作が行われる必要がある。

- 分割された AS が区域ごとに内部経路を設定する。
- 分割された AS の区域が他 AS と BGP によって経路を交換し、別の区域の経路情報を得る。

BGP による partition healing の例を図 5.19 に示す。

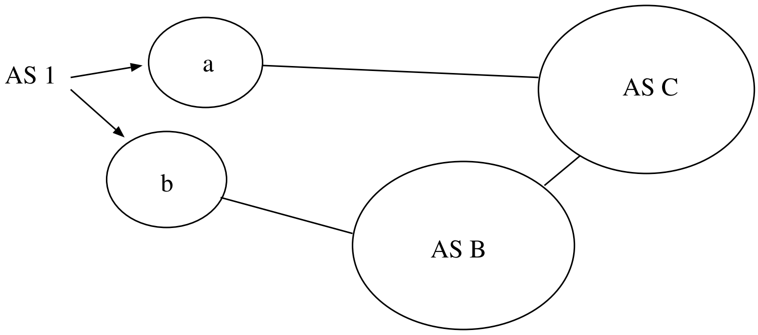

図 5.19: BGP による partition healing

5.7.4 各エリア間で広告する経路

本節では、UD Summaly LSA を用いて広告するエリア間の経路情報を規定する。
UDL 上のノード間で直接エリア間経路を広告する必要があるトポロジは、複数の場合が考えられる。

1. RCF(SOF) が ABR で、片方のエリア内で RCF(SOF) と Receiver が片方向にだけ接続性がある場合

2. SOF が ABR で、片方のエリア内で RCF と SOF が片方向にだけ接続性がある場合
3. Receiver が ABR で、片方のエリア内で Receiver と RCF(SOF) が片方向にだけ接続性がある場合
4. RCF が ABR で、片方のエリア内で RCF と SOF が片方向にだけ接続性がある場合

これらを図 5.20 に示す。

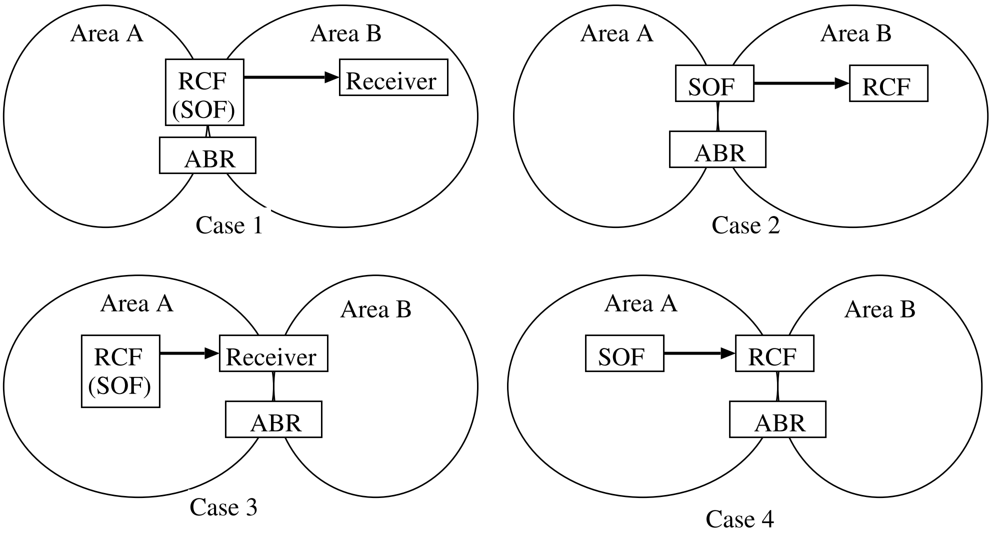

図 5.20: エリア内の経路情報を他エリアに広告する必要があるトポロジ

この他、エリア分割によりエリアの一部が他の部分と片方向にだけ接続性がある場合も考えられる。この場合の動作は後述する。

上記のトポロジは次のように抽象化できる。

- Receiver が RCF(または SOF) に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が UDL と同じエリア内に存在しない場合
- RCF が SOF に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が UDL と同じエリア内に存在しない場合

Type 12 UD Summary LSA では、ルータが直接接続しているエリア内のネットワークプレフィクスを広告する。また、ルータがバックボーンエリアに接続している場合、バックボーンエリア内で他の ABR が広告しているネットワークプレフィクスも広告する。バックボーンエリア内のネットワークプレフィクスや、バックボーンエリア内で他の ABR が広告しているネットワークプレフィクスを Type 12 UD Summary LSA で広告する場合、B-bit を 1 に設定する。

Type 13 UD Summary LSA では、ルータが直接接続しているエリア内の ASBR を広告する。また、ルータがバックボーンエリアに接続している場合、バックボーンエリア内で他の ABR が広告している ASBR も

広告する。バックボーンエリア内のASBRや、バックボーンエリア内で他のABRが広告しているASBRをType 13 UD Summary LSAで広告する場合、B-bitを1に設定する。

UD Summary LSAを保持するRCFおよびSOFは、次の規定に沿ってSummary LSAを各エリアに広告する。

- UD Summary LSAにB-bitが設定されていない場合
  接続する全てのエリアに広告
- UD Summary LSAにB-bitが設定されている場合
  バックボーンエリア以外で、接続する全てのエリアに広告

このように、バックボーンエリア内の到達性情報やバックボーンエリアで広告された経路は、UD Summary LSAで広告された場合もSummary LSAによってバックボーンエリアに広告しない。その理由は5.7.7節で述べる。

5.7.5 通常エリア間の直接接続

OSPFの規定では、各エリア間のトラフィックは必ずバックボーンエリアを中継するとされている。しかし、一部の実装では設定によりバックボーンエリアに接続しないABRを用いて、通常エリアを直接接続できる。例えばCiscoの実装では、バックボーン以外のエリア間で動作するルータにおいて、Loopbackインタフェースを疑似的にバックボーンエリアに接続させ、直接接続するエリア内の経路だけを別エリア内に広告できる。これを図5.21に示す。

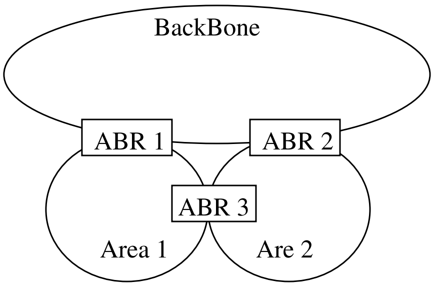

図5.21: 通常エリアの直接接続

ABR3はエリア2内のネットワークプレフィクスとASBRをエリア1に広告する。また、エリア1内のネットワークプレフィクスとASBRをエリア2に広告する。これにより、エリア1内のノードとエリア2内のノードはABR3を経由して通信できる。ただし、ABR3はバックボーンエリアに接続していないので、直接接続しているエリア以外のネットワークプレフィクスやASBRは広告しない。このような機能が実装されている理由は、OSPFのエリア同士を直接接続しABRが直接接続するエリア内の経路情報を別エリアに広告してもループが生じないからである。

衛星回線は地理的に遠く離れたノード間を直接接続できる通信媒体である。このため、同一の衛星リンク上のルータが複数のエリアに接続する場合が考えられる。例として、図5.22のトポロジを示す。

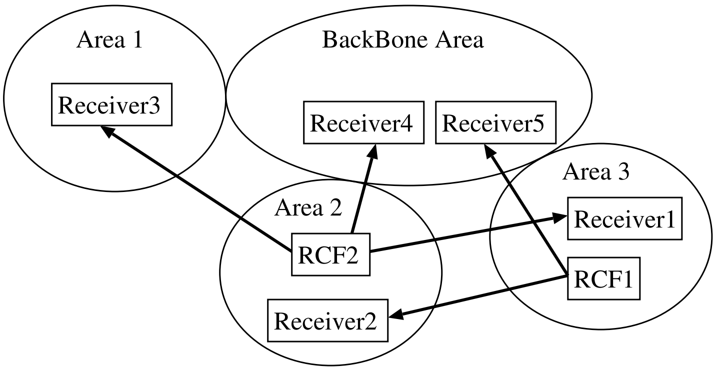

図 5.22: 多数のエリアにまたがる衛星リンク

このようなトポロジでは、エリア間に位置する衛星ルータが直接接続するエリア間のトラフィックを中継すると効率がよい。例えば、各エリア間のトラフィックを全てバックボーンに中継させた場合、RCF1 から Receiver2 へのリンク、RCF2 から Receiver1 へのリンク、RCF2 から Receiver3 へのリンクを利用できない。本設計では" エリア間に位置するルータは直接接続するエリア内の経路情報を隣接エリアに広告し、エリア間のトラフィックを中継する" と定義する。

5.7.6 エリア分割時の動作

あるエリアが分割された場合、分割された区分は別々のエリアとして動作する。例えば図 5.13 のトポロジでは、Receiver とルータ X が一つのエリア (エリア A) を形成し、残りのルータ (RCF、SOF、ルータ Y、ルータ Z) がもう一つのエリア (エリア B) を形成している。これら 2 つのエリアは UDL 上のノードを経由して隣接している。

本機構を用いた場合、Receiver が RCF や SOF へ UDL Hello を送信する際、Return Address への経路がエリア内に存在しないと検知する。このため、自分自身が ABR であると判断し直接接続するエリア内のネットワークプレフィクスと ASBR を広告する UD Summary LSA を作成する。Receiver と RCF、Receiver と SOF がエリア外の経路によって通信できる場合、UD Summary LSA は UDL 上の隣接ルータ間で同期され、その内容は Summary LSA によってエリア B に広告される。これにより、エリア B 内のノードは UDL を経由しエリア A 内のネットワークプレフィクスや ASBR へ到達できる。これを図 5.23 に示す。

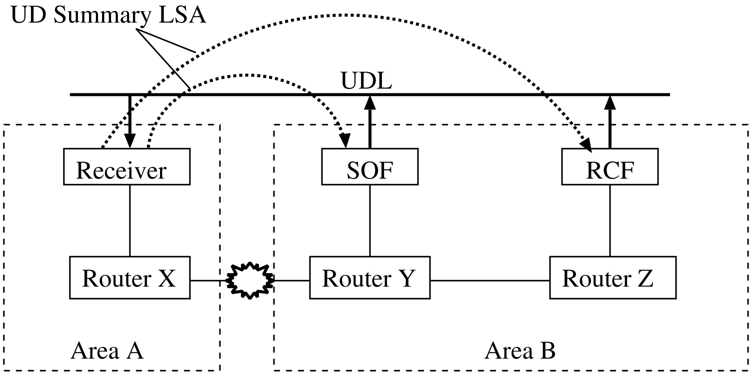

図 5.23: エリア分割時におけるエリア間経路制御

エリア分割が生じた際も、UD Summary LSA で広告するのは直接接続する区分内の経路情報だけである。例えば、エリア分割によって図 5.24 のトポロジが生じたとする。このトポロジは、双方向のリンクがダウンしてエリア X が区分 A、区分 B、区分 C に分かれている。A、B、C は異なる LSDB を持つルータ群である。

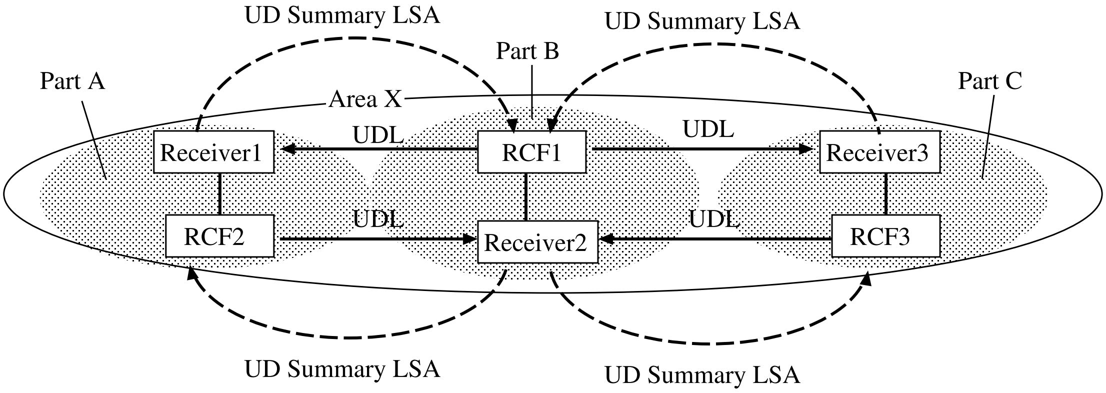

図 5.24: エリアが 3 つ以上に分割されたトポロジ

図 5.24 のトポロジでは、エリア A 内のノードとエリア C 内のノードはエリア B を経由して通信しない。その理由は、エリア間のトラフィックを中継できるエリアはバックボーンエリアだけだからである。

例えば、エリア A 内のノードとエリア C 内のノードがエリア B を経由して通信するためには、RCF1、Recever2 は直接接続する区分の経路だけでなく、区分 A の経路を区分 C に、区分 C の経路を区分 A に広告する必要がある。その場合、次のように LSA が広告される。

1. Receiver1 が区分 A の経路を UD Summary LSA によって広告し、RCF1 と同期させる。

2. RCF1 が Summary LSA を作成し、区分 A の経路を区分 B 内に広告する。
3. Receiver2 が区分 A の経路を UD Summary LSA によって広告し、RCF2 および RCF3 と同期させる。
4. RCF2 が Summary LSA によって区分 A の経路を区分 A 内に広告する。
5. RCF3 が Summary LSA を作成し、区分 A の経路を区分 C 内に広告する。

ここで、区分 A 内のネットワークプレフィクス X が到達不可能になったとする。Receiver1 はネットワーク X を広告していた UD Summary LSA を排除しようと動作する。しかし、RCF2 はネットワーク X を含む区分 A 内全ての経路を広告しており、Receiver1 は RCF2 からネットワーク X へ到達できると判断する。その結果、Receiver1 は新しい UD Summary LSA によってネットワーク X を RCF2 へ広告してしまう。RCF2 はその内容を Summary LSA によって区分 B 内に広告する。Receiver2 はネットワーク X がエリア外の経路になりコストが高くなったと判断し、新しい UDL Summary LSA を作成する。このようにして、UDL に接続する全てのノード間でネットワーク X へのコストが無限にカウントされ続ける。したがって、エリア分割の際に UD Summary LSA によって到達性を広告してよいのは Receiver(または RCF) が直接接続する区分内の経路だけである。

5.7.7 バックボーンエリアにおける制限

本節では、バックボーンエリア内の到達性情報やバックボーンエリアで広告された経路は、UD Summary LSA で広告された場合も Summary LSA によってバックボーンエリアに広告しない理由を述べる。

例として図 5.25 のトポロジを示す。このトポロジは、双方向のリンクがダウンしてバックボーンエリアが区分 A と区分 B に分かれている。A と B は異なる LSDB を持つルータ群である。

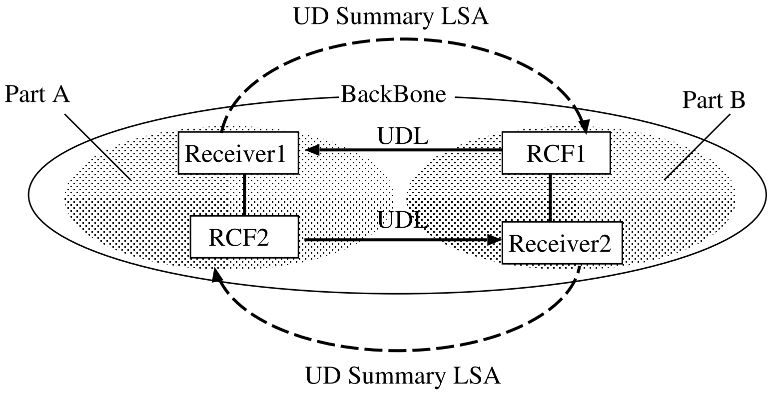

図 5.25: バックボーンエリアが分割されたトポロジ

区分 A 内のネットワークプレフィクスを区分 B に広告した場合、次のループが生じる可能性がある。

1. Receiver1 が区分 A 内のネットワークプレフィクス X を Type 12 UD Summary LSA で広告する。

2. RCF1 はその内容を Summary LSA によって区分 B に広告する。
3. Receiver2 はバックボーンエリアに接続しているため、区分 B 内のネットワークプレフィクスとバックボーンエリア内の他の ABR が広告するネットワークプレフィクスを Type 12 UD Summary LSA で広告する。
4. Receiver2 が広告する Type 12 UD Summary LSA は、RCF1 が区分 B に広告したネットワークプレフィクス X を含む。
5. RCF2 はその内容を Summary LSA によって区分 A に広告する。
6. 区分 A 内でネットワークプレフィクス X が到達不可になった場合、Receiver1 は RCF2 を経由して X に到達できると判断する。
7. Receiver1 は新しい Type 12 UD Summary LSA を作成しネットワークプレフィクス X を広告する。

バックボーンエリアに接続する Receiver(または RCF) は、バックボーンエリア内の他の ABR が作成した Summary LSA の内容を UD Summary LSA で広告する。このため、そのような経路情報を再び Summary LSA でバックボーンエリアに広告すると、別の経路情報だと判断されループを生じる可能性がある。

5.8 AS 外経路のルーティング

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ッディングされる。

AS External LSA には Type 1 と Type 2 の 2 種類がある。Type 1 External LSA によって広告された経路は、LSA 自体が広告するコストと ASBR までのコストを足し、総合的なコストが小さかった経路が選ばれる。ASBR までのコストは、次のように計算される。

- ASBR がエリア内の場合
  エリア内の経路計算による
- ASBR がエリア外の場合
  ASBR までの到達性を広告する Type4 Summary LSA のコストと、その LSA を作成した ABR までのコストを足す。

Type 2 External LSA によって広告された経路は、LSA 自体が広告するコストだけで比較される。

UDL を含むネットワークにおける AS 外部経路の広告例を図 5.26 に示す。

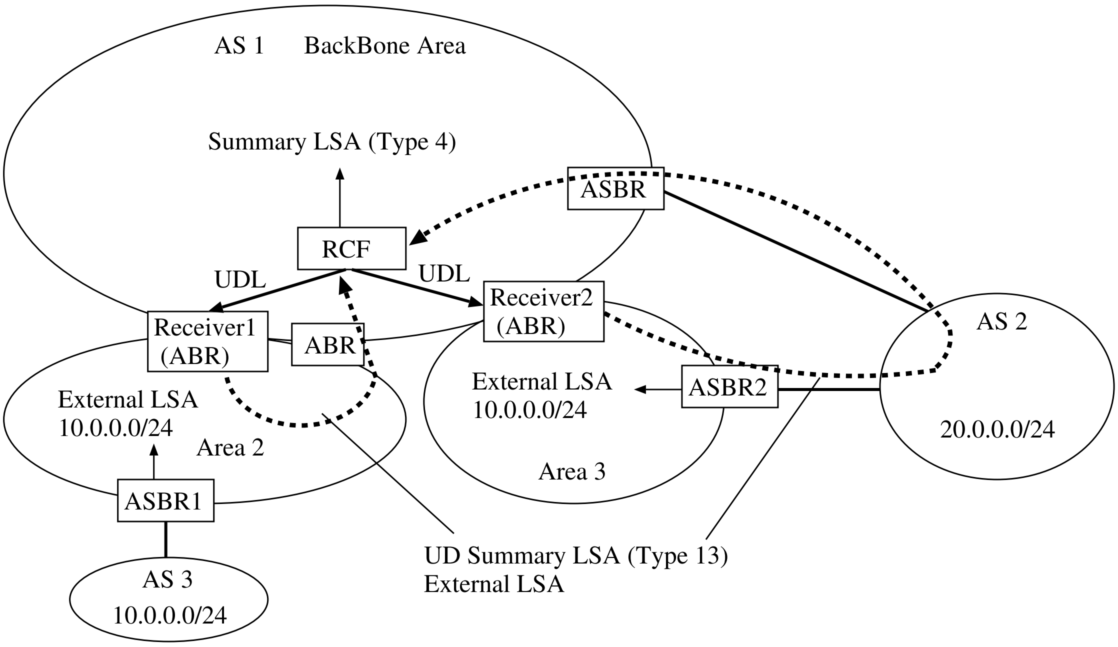

図 5.26: UD External LSA による AS 外部経路の広告

図 5.26 のトポロジでは、ASBR1 は AS3 と接続しており、ASBR2 は AS2 と接続している。ASBR1 が作成した AS External LSA は AS1 内全域にフラッディングされている。また ABR は Type 4 Summary LSA によって ASBR1 をバックボーンエリアに広告している。Receiver1 は、Type 13 UD Summary LSA を作成し ASBR1 を広告する。Receiver1 と RCF は UD Summary LSA を同期させる。RCF は Type 4 Summary LSA を作成し、ASBR1 をバックボーンエリアに広告する。バックボーンエリアのルータは、ASBR1 に到達する経路として UDL を由する経路と ABR を経由する経路を選ぶ。

- UDL を経由する経路
  バックボーンエリア内における RCF までのコスト + UDL のコスト + Receiver1 から ASBR1 までのコスト
- ABR を経由する経路
  バックボーンエリア内における ABR までのコスト + ABR から ASBR1 までのコスト

エリア 3 はバックボーンと Receiver2 だけで接続されており、AS 内の経路を用いてトラフィックの受信だけが行えるエリアである。エリア 3 は AS 内の別エリアへの経路を持たず、外部 AS を経由して自 AS にパケットを送信する。Receiver2 は、ASBR2 までのコストを Type 13 UD Summary LSA によって広告する。RCF は Type 4 Summary LSA を作成し、バックボーンエリアに広告する。しかし、ASBR2 が広告する AS External LSA は AS1 内にフラッディングされていない。このため、AS1 内のルータは ASBR2 までの経路は計算できるが、ASBR2 を経由し AS2 へ到達する経路は計算できない。この問題を解決するため、次のように定義する。

- Receiver が RCF(または SOF) に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が AS 内に存在しない場合、直接接続するエリア内の ASBR が作成した AS External LSA を RCF(または SOF) と同期させる。

- RCF が SOF に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が AS 内に存在しない場合、直接接続するエリア内の ASBR が作成した AS External LSA を SOF と同期させる。

Receiver2 は ASBR2 が広告する AS External LSA を RCF と同期させる。RCF はこの AS External LSA を別エリアの LSDB の同期リストに追加する。これにより、ASBR2 が広告する AS2 への経路が AS1 内全体にフラッディングされ、UDL を経由して AS2 に達する経路が計算される。

5.9 LSDB の同期

OSPF ルータはエリアごとに LSDB の同期リストを保持する。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。

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、次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 と RCF

- Receiver と SOF

- RCF と SOF

Receiver が RCF(または)SOF に UDL Hello を送信するとき、Retrun Address 宛の経路が UDL と同じエリアに存在する場合、LSA の同期リストは空に設定する。同様に、RCF が SOF に UDL Hello を送信するとき、Retrun Address 宛の経路が UDL と同じエリアに存在する場合、LSA の同期リストは空に設定する。

また、Receiver が RCF(または SOF) に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が UDL と同じエリア内に存在しない場合、UD Summary LSA を作成し LSA の同期リストに加える。同様に、RCF が SOF に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が UDL と同じエリア内に存在しない場合、UD Summary LSA を作成し LSA の同期リストに加える。

更に、Receiver が RCF(または SOF) に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が AS 内に存在しない場合、直接接続するエリア内の ASBR が作成した AS External LSA を同期リストに加える。RCF が SOF に UDL Hello を送信するとき、Return Address 宛の経路が AS 内に存在しない場合、直接接続するエリア内の ASBR が作成した AS External LSA を同期リストに加える。

Receiver または RCF から UDL Hello を送信するときに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 5.3 に示す。

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

表 5.3: LSA の同期リスト

第6章　評価

本章では、本研究で設計したOSPFの拡張機構とトンネリングを用いた従来の解決手法を比較し、定性的な評価を述べる。評価項目は規模性、安定性、適応するトポロジの3項目である。それぞれの項目においてどのような観点から評価を行うか述べ、比較結果を示す。

6.1　規模性の比較

6.1.1　評価内容

衛星回線には多数のノードが接続する可能性がある。特に衛星回線では受信局の数に制限がないため、あらゆる規模のReceiverが接続することが予想される。UDLに大規模なノードが接続した場合も、短い時間で経路が収束し、ルータにできるだけ負荷をかけない経路制御プロトコルが有用である。

また、OSPFは経路制御ドメインを複数のエリアに分割する機能を持つ。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。また、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定できる機構は規模性に優れている。

6.1.2　評価結果

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、通常の回線に比べて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。また、2.2.2節で述べた問題により、既存の解決法はネットワークをエリア分けできるトポロジが限られている。

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。

6.2 安定性の比較

6.2.1 評価内容

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。

6.2.2 評価結果

トンネリングを用いた解決法では、UDL に接続するノード間において AS 内に他の経路を用いた接続性がない場合と、エリア内に他の経路を用いた接続性がない場合に Route Flap が生じる。その理由は 2.2.2 節で述べた。

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 [16] と安定性 [17] 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。

6.3 適応トポロジの比較

6.3.1 評価内容

2.2.2 節で述べた通り、トンネリング機構を用いて OSPF を動作させた場合、次のトポロジで問題が生じる。

1. RCF と SOF が存在するトポロジ
2. 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

本節では、上記の問題を本研究で設計した OSPF が解決しているか評価する。

6.3.2 評価結果

5.2.5 で述べた通り、本研究の設計では RCF と SOF が存在するトポロジにおいて SOF が独自に DR として動作し Network LSA を作成する。UDL 上における論理的な接続性を RCF と SOF が別個に広告することで、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、1 のトポロジにおける問題を解決している。

2 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、この UDL リンクを通常の BDL リン

クと同様に扱うため、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、Receiver が RCF や SOF に UDL Hello を送信する時に用いる経路によって、エリア内に BDL リンクが存在しないことを検知し、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する。

6.4 評価のまとめ

トンネリングを用いた解決法は、問題の短期的な解決を目指しており、一つの機構で全ての経路制御プロトコルを動作させられる点が特徴である。本研究は UDL を含むネットワークにおける経路制御の問題を完全に解決することを目的としている。したがって、この 2 つの手法は目的や意義が異なるため、どちらが優れた機構であるとは言えない。

しかし、トンネリングを用いた手法により OSPF を動作させた場合と、本研究で設計した OSPF の拡張機構を用いた場合では、規模性、安定性、適応トポロジの全ての点において本研究で設計した OSPF が優れた動作を行うことが分かった。

第7章　まとめと今後の課題

7.1　まとめ

本研究では、衛星回線や地上波など片方向に用いる手法が有効な通信路をインターネットで利用する場合における動的経路制御の問題を解決した。

衛星回線は既存の地上回線にない様々な特性を持っている。また、片方向通信路 (UDL) として利用することが非常に有効な通信媒体である。しかし、インターネットの経路制御機構は通信媒体が全て双方向性を持つことを前提にしている。そのため、UDL を含むネットワークでは既存の経路制御プロトコルが正しく動作しない。この問題を解決するため、トンネリングによって UDL 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提案されている。しかし、この手法ではトポロジによって経路が不安定になる、RCF と SOF が同時に存在するトポロジでは RCF から SOF へ到達する間違ったリンクが経路として使われる可能性があるなど、問題の完全な解決には至っていない。

本研究では、UDL を含むネットワークにおける動的経路制御の問題を解決するため、OSPF の機能を拡張し UDL 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。経路制御プロトコルの設計にあたり、衛星回線など片方向に利用できる通信媒体を用いて構築できるリンクの抽象化を行った。本論文では、UDL を用いたリンクを Simple UDL、Point-to-Point リンク、UDL メッシュ、Complex UDL の 4 種類に分類した。また、これらのリンクをインターネット上で用いる場合、矛盾のないネットワークを構築するため必要な原則を示した。その結果、インターネット上で UDL を用いる場合、一つのサブネット上に存在するノードは送受信可能なノード (RCF)、送信専用ノード (SOF)、受信専用ノード (Receiver) の 3 種類であると述べた。

本研究で設計した OSPF の拡張機能は次の特徴を持つ。

- 互換性
  既存の OSPF 機構と完全な互換性を保ち、UDL に直接接続するルータで動作させることで、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。本設計では、UDL 上における各ノード間の接続性を従来の Router LSA と Network LSA によって広告する手法を考案し、これを実現した。

- 規模性
  衛星回線など大規模なノードが一つの UDL に接続するトポロジを考慮し、UDL に接続するノード間では独自のトポロジデータベースの同期方法を用いる。

- 安定性
  UDL Hello プロトコルにより、UDL を含むネットワークにおけるトポロジの変化を動的に検知する。また、その結果によって即座に新しい LSA を作成し広告する。これにより、ネットワーク内の全てのルータが迅速に新しい経路を計算できる。

- 適用トポロジ
  本設計は UDL を含むあらゆるネットワークトポロジを想定している。UD Summary LSA を新しく定義し、これを用いてエリア間ルーティング、AS 外経路ルーティングを行う。また、エリア分割など特殊な状況においてトポロジの変化を動的に検知し、エリア間ルーティングを行う機能を持つ。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にも対応する。

本研究で設計した新しいOSPF 機構により、UDL 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。これによって、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、地域や国家を越えた広域ネットワークの構築が可能になる。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。

7.2 今後の課題

今後、本研究で設計したOSPF を実装し様々なトポロジで動作検証を行う予定である。また、実際に衛星回線を用いたネットワークで試験運用を行い、有効性を確認する予定である。本研究の成果はIETF(Internet Engineering Task Force) において Internet-Draft として公開し、より広く議論する予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり御指導をいただきました慶應義塾大学環境情報学部教授の村井純博士に深い感謝の意を表します。また、絶えず御助言を頂きました同学部の楠本博之博士、中村修博士、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授の山口英博士に感謝いたします。

西田視磨氏、小原泰弘氏をはじめとする慶應義塾大学政策メディア研究科の方々には、本研究に関して貴重な御助言を頂き、本研究を進める上で不可欠な議論をして頂きました。また、本論文の執筆に当たりまして常に励ましと御協力を下さった慶應義塾大学環境情報学部徳田・村井・楠本・中村研究会の諸兄に感謝致します。

最後になりましたが、私の学費を長年に渡り支払ってくださった両親に深く感謝致します。

関連図書

[1] Tanja Lang, Daniel Floreani, "The Impact of delayed Acknowledgments on TCP performance over Satellite Links", ACM, 2001.

[2] J. Touch, S. Ostermann, D. Glover, "Outgoing TCP Research Related to Satellites" RFC2760, February 2000.

[3] C. Elia, "Skyplex Distributed Up-Link for Digital Television via Satellite", IEEE Transactions on Broadcasting, 1977.

[4] G. S. Malkin, "RIP Version 2 Carrying Additional Information", RFC1388, January 1993.

[5] J. Moy, "The OSPF Version 2", RFC2328, April 1998.

[6] John T. Moy, "OSPF Anatomy of an Internet Routing Protocol", Addison Wesley, 1998.

[7] Stan Hanks, Tony Li, Dino Farinacci, Paul Traina, "Generic Routing Encapsulation(GRE)", RFC1701, October 1994.

[8] E. Duros, W. Dabbous, H. Izumiyama, N. Fujii, Y. Zhang, "A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidcirectional Links" RFC 3077, 2001.

[9] J. Moy, "Extending OSPF to Support Demand Circuits" RFC 1793, April 1995.

[10] Sira Panduranga Rao, Alex Zinin, Abhay Roy, "Detecting Inactive Neighbors over OSPF Demand Circuits" Internet Draft, September 2001.

[11] R. Coltun, V. Fuller, "The OSPF NSSA Option" RFC1587, March 1994.

[12] R. Coltun, "The OSPF Opaque LSA Option" RFC 2370, July 1998.

[13] Tat Chee Wan, "Interactive Wide Area Collaboration via Unidirectional Links", Aug. 2000.

[14] Rekhter Y, T. Li, "A Border Gateway Protocol4" RFC 1771, March 1995.

[15] John W. Stewart, "BGP4 Inter-Domain Routing in the Internet" Pearson Educastion, 1999.

[16] Deepinder Sidhu, Tayang Fu, Shukri Abdallah, Raj Nair, "Open Shrtest Path First(OSPF) Routing Protocol Simulation" ACM SIGCOMM93, 1993.

[17] Anindya Basu, Jon G. Riecke, “Stability Issues in OSPF Routing”, ACM SIGCOMM01, August 27-31 2001.

[18] “http://www.ai3.net”