

修士論文 2003年度(平成15年度)

実測に基づくUDLネットワークの  
設計手法に関する研究

慶應義塾大学 政策メディア研究科

氏名：臼井健

## 実測に基づく UDL ネットワークの設計手法に関する研究

本論文では、UDL を用いてネットワークを構築する場合における、ネットワーク設計と運用手法を作成した。衛星回線は広域性、同報性、地理不遍性といった特性を持ち、二地点間を結ぶ双方向回線として用いるほか、一つの送信局と多数の受信局が接続する片方向回線 (Uni-directional Link, UDL) としても利用される。UDL として用いることで、広域性、同報性といった衛星回線の特徴を活かし、多数の受信局に均質で広帯域な受信環境を提供できる。

しかし、インターネット技術は双方向回線を前提に設計されており、UDL 上では ARP などのアドレス解決プロトコルや経路制御プロトコルが動作しない。この問題に対処するため、IETF では UDL をブロードキャストリンクにエミュレートする手法 (Uni-directional Link Routing, UDLR) が提案されている。

本研究では、UDLR を用いてネットワークを構築する際に、最も高い通信環境を実現する手法を明らかにした。本論文では、まず UDL を用いた接続形態を整理し、それぞれの場合に最適な経路制御プロトコルの設定方法を述べる。UDLR はトンネリングを用いており、経路制御プロトコルメッセージなど同一リンク上で必要な通信が実現されている。しかし、全てのトラフィックをトンネリングすることはネットワーク性能を低下させるため、トンネリングが必要な場合と、そうでない場合とを区別した。

次に、UDL を用いたネットワークに流れるトラフィックに関する考察を行った。AI<sup>3</sup> ネットワークでは、実際に UDL を用いたテストベッドを構築しており、そのトラフィックデータを解析した。本ネットワークにおけるユーザトラフィックのアプリケーションごとの割合や全体のトラフィック傾向を述べ、UDL を用いたネットワークを構築する場合に想定すべきトラフィックパターンを定義した。

また、UDL ネットワークの性能評価を行った。UDLR によってアプリケーショントラフィックがカプセル化された場合、カプセル化しない場合と比べてトラフィック量がどの程度変化するか調査し、カプセル化の影響が UDL の受信性能に与える影響を明らかにした。また、AI<sup>3</sup> ネットワークのように、狭帯域な地上回線と広帯域な UDL を用いたネットワーク環境では、BDL と UDL の性能に相関関係がある。この視点に基づきデータ解析を行い、ある帯域の BDL を用いた場合、UDL を用いて受信できるトラフィック量の限界を導いた。これにより、UDL と BDL を併用した環境において BDL に輻輳が生じた場合、その回線をどの程度増強すれば UDL の性能を最大にできるかの指標が得られた。また、このデータから UDL の帯域内でユニキャストトラフィックには使用されない、余剰の帯域幅が分かる。これにより、マルチキャストによる放送型のアプリケーションを利用する場合に、ユニキャストの通信に影響を与えない範囲で利用できる UDL 上の帯域幅が分かる。

### キーワード

1. ネットワーク設計, 2. トラフィック, 3. 経路制御, 4. UDL, 5. 衛星回線

慶應義塾大学 政策・メディア研究科

臼井健

Academic Year 2003

---

## The Study on the design of UDL network based on an actual measurement

This Paper describes the construction method of Unidirectional Link network. The satellite Link has a characteristic of enable of wide area collaboration,broadcasting, and connectivity in the time of disaster. And,The satellite link is able to be used in a developing terrestrial area quickly. The satellite link is used by not only Point-to-Point link but also Uni-directional Link. Using the satellite link as the UDL enable us to give the broad band connectivity to many receive sites.

But,in the internet, the bidirectional communication is used usually. So,ARP and routing protocol don't go correctly in the UDL network. In the IETF, UDLR(Unidirectional Link Routing) is developed to emulate the broadcast link in the udl link.

This paper arranges the udl network topology and make a guideline of the operation (ex .the best routing method). UDLR use the IP-tunneling, and enable the routing protocol message to communicate in the link. But when all the traffic go throught the tunneling link ,the quality of network will go down. So,I distinguish the network topology that we must use the tunneling ,and the case that we may not use the tunneling.

Next,I monitor and analize the traffic of UDL network in the actual internet. I analize the *AI<sup>3</sup>* traffic,which construct the UDL network in the asia area. And,I describe the traffic trend and the usage of the application ,and define the traffic patten in constructing the UDL network.

I evaluate the quality of UDL network. There is a relation with the low band terrestrial link and udl link throughput. In this vipwpoint,I analize ,and construct the method to use the UDL network throughput at the maximum. And,I analize the application throughput when the traffic go throughout the tunneling link or not . I explain the influence of the UDLR tunneling for the quality of network. And, We can estimate the BDL bandwidth for the more usage of UDL link. We can know the surplus traffic which the unicast traffic don't consume in the UDL link. When we use the multicast broadband application, we can know the UDL bandwidth which don't affect the unicast communication badly.

Keywords :

1. network design, 2. traffic, 3. routing, 4. UDL,5. satellite

Keio University , Media and Governamce

Takeshi Usui

# 目 次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景 . . . . .	1
1.2 片方向衛星回線 . . . . .	2
1.3 研究目的 . . . . .	2
1.4 本論文の構成 . . . . .	3
<b>第 2 章 問題点</b>	<b>4</b>
2.1 問題意識 . . . . .	4
2.2 経路制御 . . . . .	4
2.2.1 行きと返りの経路 . . . . .	4
2.2.2 ソースアドレス . . . . .	5
2.3 通信品質 . . . . .	6
2.3.1 トンネル . . . . .	6
2.3.2 BDL の帯域 . . . . .	7
2.3.3 QoS 制御 . . . . .	8
2.4 まとめ . . . . .	9
<b>第 3 章 インターネットにおける UDL の利用</b>	<b>10</b>
3.1 UDL の利用 . . . . .	10
3.2 UDLR . . . . .	10
3.2.1 UDLR の概要 . . . . .	10
3.2.2 UDLR が解決する問題点 . . . . .	10
3.3 その他の解決手法 . . . . .	12
3.3.1 プロキシサーバーを用いた方法 . . . . .	12
3.3.2 アドレス変換技術を用いた方法 . . . . .	12
3.3.3 SLCP (Satellite Link Configuration Protocol) . . . . .	13
3.4 解決手法の比較 . . . . .	14
<b>第 4 章 本研究のアプローチ</b>	<b>15</b>
4.1 ネットワーク設計 . . . . .	15
4.2 本研究の注目点 . . . . .	15
4.3 AI <sup>3</sup> UDL ネットワークの利用分析 . . . . .	16
4.4 UDL ネットワークの構成 . . . . .	16
4.5 UDL サイトの通信品質 . . . . .	16

---

<b>第 5 章 <i>AI<sup>3</sup></i> における UDL の利用分析</b>	<b>18</b>
5.1 <i>AI<sup>3</sup></i> ネットワーク . . . . .	18
5.1.1 概要 . . . . .	18
5.1.2 ネットワークトポロジ . . . . .	18
5.2 <i>AI<sup>3</sup></i> UDL ネットワークのトラフィック分析 . . . . .	20
5.2.1 <i>AI<sup>3</sup></i> UDL Traffic Repository の設計と実装 . . . . .	20
5.2.2 <i>AI<sup>3</sup></i> UDL サイトの構成法 . . . . .	20
5.2.3 各パートナー毎のトラフィック . . . . .	20
5.2.4 コモディティトラフィックとマルチキャストトラフィック . . . . .	21
5.2.5 UDL サイトへのトラフィック . . . . .	22
5.2.6 UDL サイトからのトラフィック . . . . .	27
5.2.7 トンネルの影響 . . . . .	29
5.2.8 まとめ . . . . .	31
<b>第 6 章 UDL を用いたネットワーク構成法</b>	<b>33</b>
6.1 本章の方針 . . . . .	33
6.2 ユニキャスト経路制御 . . . . .	33
6.2.1 UDL、BDL 隣接型 . . . . .	33
6.2.2 コスト制御型 . . . . .	34
6.2.3 UDL マルチホーム型 . . . . .	35
6.2.4 UDL を用いた BGP 接続 1 . . . . .	36
6.2.5 UDL を用いた BGP 接続 2 . . . . .	37
6.2.6 まとめ . . . . .	38
6.3 マルチキャスト . . . . .	39
6.3.1 マルチキャスト経路制御プロトコルを利用する際の問題点 . . . . .	39
6.3.2 DVMRP の利用 . . . . .	40
6.3.3 PIM-DM の利用 . . . . .	40
6.3.4 PIM-SM の利用 . . . . .	41
6.3.5 ドメイン間マルチキャスト . . . . .	42
6.3.6 まとめ . . . . .	43
<b>第 7 章 UDL サイトの性能測定</b>	<b>44</b>
7.1 既存の研究 . . . . .	44
7.1.1 TCP のスループット . . . . .	44
7.1.2 既存の研究と本研究の関係 . . . . .	44
7.2 測定方法 . . . . .	44
7.2.1 想定する環境 . . . . .	44
7.2.2 パラメータ . . . . .	45
7.2.3 トラフィックのモデル化 . . . . .	45
7.2.4 測定ネットワーク環境 . . . . .	48
7.2.5 測定 . . . . .	48
7.3 測定結果 . . . . .	48
7.4 UDL と BDL の関係のモデル化 . . . . .	50

---

7.4.1 モデル化の方法 . . . . .	50
7.4.2 回帰式の算出 . . . . .	55
7.4.3 統計的正当性 . . . . .	55
7.5 まとめ . . . . .	58
<b>第8章 結論</b>	<b>59</b>
8.1 まとめ . . . . .	59
8.2 今後の課題 . . . . .	59
8.2.1 UDL ネットワークの構築 . . . . .	59
8.2.2 UDL ネットワークの性能向上手法の検討 . . . . .	60

# 図 目 次

1.1 UDL を用いたネットワーク概観図	2
2.1 行きと返りの経路が異なるネットワーク	5
2.2 UDL により AS を超えてネットワークを接続	5
2.3 UDLR によるカプセル化	6
2.4 Feeder によって脱カプセル化される	7
2.5 ブラビジャヤ大学の UDL の使用帯域	8
2.6 ブラビジャヤ大学の BDL の使用帯域	8
3.1 UDLR で用いられるトンネルの概要図	11
3.2 SLCP の概要図	13
5.1 <i>AI<sup>3</sup></i> UDL ネットワークの全体図	19
5.2 各々サイト毎のトラフィック	21
5.3 UDL に流れるコモディティトラフィックとマルチキャストトラフィック	22
5.4 Brawijaya のトラフィック	23
5.5 Brawijaya のパケットサイズの分布	23
5.6 Brawijaya が受信する主なトラフィック	24
5.7 Unhas のトラフィック	24
5.8 Unhas のパケットサイズの分布	25
5.9 Unhas が受信するトラフィック	25
5.10 ITB のトラフィック	26
5.11 ITB のパケットサイズの分布	26
5.12 ITB が受信する主なトラフィック	27
5.13 Feeder へのトラフィック	27
5.14 UDL サイトからが送信される主なトラフィック	28
5.15 Feeder へのパケットサイズの分布	28
5.16 Feeder へ送信された GRE パケットのパケットサイズの分布	29
5.17 Feeder に到達したパケットの総量と Feeder により脱カプセル化後に送信したパケットの比較	30
5.18 Feeder に到達したパケットサイズの総量と Feeder により脱カプセル化されたパケットのパケットサイズの総量	31
5.19 カプセル化されたパケット、脱カプセル化されたパケット総量の比較	31
6.1 UDL、BDL 隣接型のトポロジ図	33
6.2 コスト制御のトポロジ図	34

---

6.3	UDL マルチホームのトポロジ図	35
6.4	UDL を用いた BGP 接続 1 のトポロジ図	36
6.5	UDL を用いた BGP 接続 2 のトポロジ図	37
6.6	UDL と BDL でトラフィックの振り分け	38
6.7	DVMRP を用いたネットワークのトポロジの例	40
6.8	PIM-SM を用いたネットワークのトポロジの例	41
6.9	ドメイン間マルチキャストのトポロジの例	42
7.1	BDL 回線輻輳時の Brawijaya トラフィック	45
7.2	サーバ、クライアント間の HTTP プロトコルの流れ	47
7.3	測定ネットワーク環境	48
7.4	トンネルを経由しない場合の UDL の使用帯域	49
7.5	トンネルを経由する場合の UDL の使用帯域	50
7.6	最小二乗法のイメージ	51
7.7	トンネルを経由しない場合の UDL と BDL の散布図	52
7.8	トンネルを経由する場合の UDL と BDL の散布図	53
7.9	トンネルを経由しない場合の UDL と遅延の散布図	54
7.10	トンネルを経由する場合の UDL と遅延の散布図	54
7.11	トンネルを経由しない場合、UDL の使用帯域に関する残差と実測値の散布図	56
7.12	トンネルを経由しない場合、UDL の使用帯域に関する残差と予測値の散布図	57
7.13	トンネルを経由する場合、UDL の使用帯域に関する残差と実測値の散布図	57
7.14	トンネルを経由する場合、UDL の使用帯域に関する残差と予測値の散布図	58

# 表 目 次

3.1 UDL をインターネットで用いるための解決法の比較 . . . . .	14
5.1 <i>AI<sup>3</sup></i> UDL サイト . . . . .	19
6.1 各トポロジの特徴と使用技術 . . . . .	39
7.1 決定係数と有意確率 . . . . .	56

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

インターネットの発展とともに、様々な通信媒体がネットワークのインフラストラクチャとして用いられるようになった。静止起動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の1つである。衛星回線は、地理的に遠く離れた地点間を直接接続できる(広域性)、同じ情報を同時に複数の受信局に送信できる(同報性)といった特性を持ち、地球局を設置すれば即座に利用できる通信媒体である。地上回線の整備が遅れている地域では、広帯域な地上回線を新たに敷設するより、衛星回線を用いるほうが容易に広帯域なネットワークを構築できる。また、データを同時に多人数に配達する用途に対して、有効に利用できる。

衛星回線では、同時に送信できる地球局が一つなのに対し受信専用局はいくつ存在してもよい。また、衛星回線で利用できる周波数帯には限りがある。あるネットワークに複数の地点を接続する場合、各地点に個別に双方向の衛星回線を設置するよりも、複数の受信専用局が接続する一本の共有回線を設置したほうが周波数帯を効率良く利用でき、広帯域な回線を設置できる。このように、片方向に用いた衛星回線を Uni-directional Link(UDL) と呼ぶ。

UDL を用いたインターネット接続では、双方向通信を実現するために、データの送信に地上回線、データの受信に衛星回線といったように複数の回線が併用される。しかし、インターネットの基盤技術は通信媒体が双方向回線であることを前提に設計されている。そのため、UDL 上では ARP などのアドレス解決プロトコルや経路制御プロトコルが正しく動作しない問題がある。その解決策として IETF では Uni Directional Link Routing(UDLR) [1] が提案されている。UDLR を利用することにより、UDL を用いて地上回線の整備が遅れている地域に対し、広帯域な接続性を容易に提供する事が可能になった。例えば、Asian Internet Interconnection Initiatives (以後 AI<sup>3</sup>) Project [3] では、UDLR を用いたネットワークを構築しており、東南アジア地域において複数の大学に広帯域な接続性を提供している。また、SOI-ASIA [2] プロジェクトによる遠隔教育が行われており、UDL 上でのマルチキャストを用いたアプリケーションが利用されている。

既存の研究により、インターネット上で UDL を利用する場合の技術的な問題が解決されているが、UDLR を用いたネットワークの最適な構成方法や、UDL を用いたネットワークの性能評価は十分に行われていない。UDL を用いたインターネット接続では、送信に双方向の地上回線 (Bi-directional Link, BDL)、受信に UDL を用い、これら複数の回線を併用して外部のネットワークと双方向の通信を行う。地上回線の整備が遅れている地域では、BDL に狭帯域な回線を用いることが多いが、狭帯域な BDL と広帯域な UDL を用いたネットワークでは、BDL が輻輳すると UDL を用いた受信も行えないという問題が生じている。その理由は、インターネットの通信の多くは双方向通信であり、特に TCP を用いた通信では、主に受信を目的とした通信の場合も ACK や制御用のメッセージを送信する必要があるからである。このような問題を解決し、UDL をインターネットのインフラストラクチャとして広く利用するためには、UDL を使ったネットワークの最適な設計と運用方法を明らかにし、実際のネットワーク上において

性能測定を行う必要がある。

## 1.2 片方向衛星回線

UDL を用いたネットワークを図 1.1 に示す。

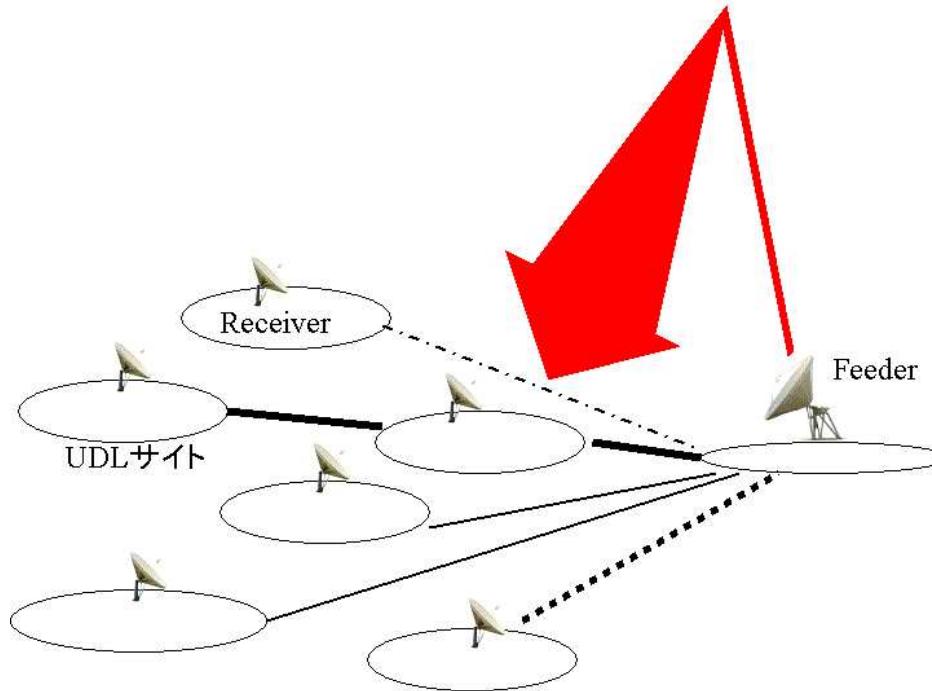


図 1.1: UDL を用いたネットワーク概観図

UDL 上には、以下の 2 種類のノードが存在する。

- Feeder—送信専用のインターフェイスをもつノード
- Receiver—受信専用のインターフェイスをもつノード

Receiver を用いてバックボーンに接続したユーザネットワークを UDL サイトと呼ぶ。UDL サイトと Feeder を含むネットワークを UDL ネットワークと言う。

## 1.3 研究目的

本研究では、まず既存の UDL ネットワークを設計し運用する際の問題点を整理する。例えば、UDLR はトンネリング技術を用いており、経路制御プロトコルのメッセージなど同一リンク上で必要な通信を実現するが、全てのトラフィックをトンネリングすると、ネットワークの性能を大きく低下させる。その理由は、トンネリングによってアプリケーショントラフィックが冗長な経路を通り、またカプセル化されサイズが増えたパケットが狭帯域な BDL を圧迫するからである。この問題を回避するため、実際の運用では、トンネリングが必要な場合とそうでない場合を明確に区別する必要がある。これを支援するため、本研究では、インターネット

上における Feeder と Receiver の接続関係を整理し、UDLR を用いたネットワークにおける最適な経路制御の設定を明らかにする。

次に、 $AI^3$  ネットワークにおける UDL の利用分析を述べ、既存の UDL ネットワークの利用傾向やトラフィックパターンに関する考察を述べる。 $AI^3$  ネットワークのように、狭帯域な地上回線と広帯域な UDL を用いたネットワーク環境では、BDL と UDL の性能に相関関係がある。本研究では、この視点に基づきデータ解析を行い、ある帯域の BDL を用いた場合、UDL を用いて受信できるトラフィック量の限界を求める。これにより、UDL と BDL を併用した環境において BDL に輻輳が生じた場合、その回線をどの程度増強すれば UDL の性能を最大にできるかの指標を得る。また、この結果から、マルチキャストによる放送型のアプリケーションを利用する場合に、マルチキャストアプリケーションとユニキャストアプリケーションの間で帯域的に UDL をどのように共有すべきか検討する。

本研究では、上記に述べた手法を用い、UDL ネットワークの設計と運用を支援するガイドラインを策定する。これにより、インターネットの枠組みに透過的に UDL を組み込み、UDL を有効に用いたネットワークを構築していくことを本研究の目的とする。

## 1.4 本論文の構成

2 章で、UDL ネットワークを適切に設計、運用していくための問題点を述べる。3 章で、UDL をインターネットの一部として用いる既存の様々な研究を紹介する。4 章で、本研究のアプローチを述べる。5 章で、 $AI^3$  ネットワークでの UDL の利用分析を述べる。6 章で、様々なネットワーク構成上での最適な UDL ネットワークの構築手法を述べる。7 章で、UDL ネットワークの性能分析を行い、8 章で本研究の結論を述べる。

# 第2章 問題点

本章では、UDLR を用いて UDL ネットワークを設計、運用していく場合の問題点を述べる。まず、経路制御方式について述べ、次に UDL サイトの通信品質について述べる。

## 2.1 問題意識

衛星回線には、他のインターネットの通信路として用いる回線と比べて、広域同報性、地理普遍性といった特徴がある。その特徴を活かすことにより、人々のインターネット利用の利便性を向上させることができる。しかし、現状では、ネットワークの一部分として用いられているのみで、必ずしも有効には用いられてない。設計手法、運用技術の確立により、更にインターネットの通信路として有効に用いることはできるのではと考える。

## 2.2 経路制御

UDL ネットワークでは送信と受信の回線を明示的に分ける。これには特殊な経路制御が必要である。UDL ネットワークで、経路制御の設定をする場合、問題になる項目について述べる。

### 2.2.1 行きと返りの経路

UDLR では、Receiver が UDL から送信するパケットをカプセル化し、地上線を用いた BDL から送信し、Feeder まで配達する。(以下で、この時、カプセル化されたパケットが Receiver から Feeder までに通る経路を「トンネル」と呼ぶ。) UDL サイトから Feeder までカプセル化し、そこから宛先まで配達される経路は、UDL サイトから直接宛先まで配達する経路に比べ冗長である。このため、UDL サイトなるべくトンネルにパケットを送信することなく、BDL から直接宛先までトライフィックを送信するのが望ましい。

次に、UDL サイトの受信経路について述べる。図 2.1 のパケットの流れのように、ノード A が送信するパケットは、Receiver の BDL から送信され、UDL で受信する形態が望ましい。そのため、行きと返りの経路が非対称となる、経路制御の設定が必要である。UDL ネットワークでは、ネットワーク管理者は常に行きと返りの経路を考慮してネットワークを設計、運用する必要がある。

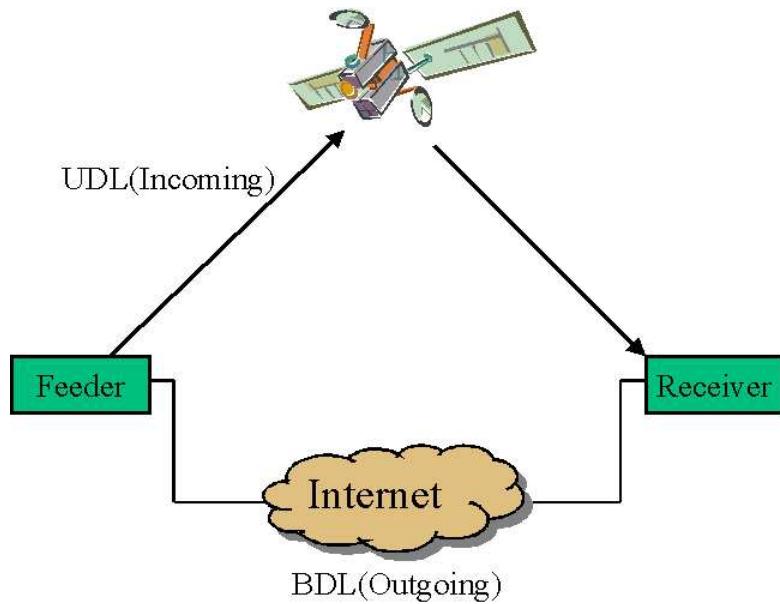


図 2.1: 行きと返りの経路が異なるネットワーク

### 2.2.2 ソースアドレス

衛星回線は地上回線に比べて広域性、地理普遍性といった特徴を持つ。この特性を用いて、物理的に離れたネットワークやの AS(Autonomous System) を超えたネットワークを構築できる。

この場合、図 2.2 のように、Receiver ルータ (または Receiver ルータに接続する UDL サイト内のルータ) は二つの AS にインターフェイスを持つ。

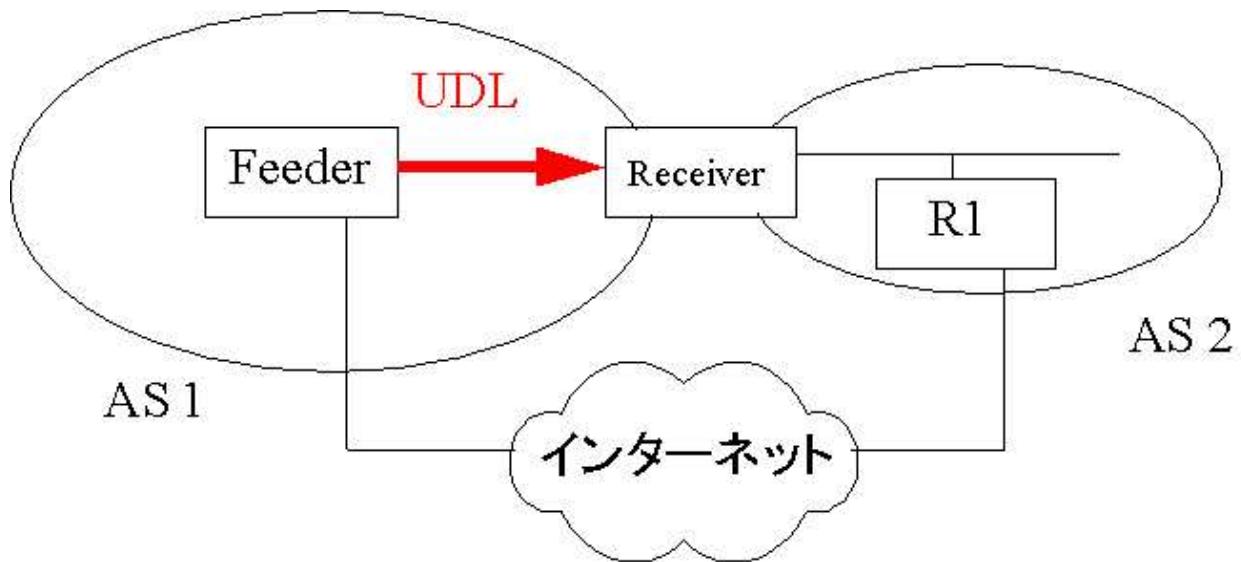


図 2.2: UDL により AS を超えてネットワークを接続

図 2.2 のトポロジでは、UDL サイトからのトラフィックは AS2 を通る。このようなネットワークでは、Ingress Filter[4] を考慮する必要がある。通常、ISP は顧客が送信するパケットの

ソースアドレスが自ネットワーク内のものでない場合、不正なパケットであると判断しフィルタする。そのため、UDL サイトから送信するパケットの送信元 IP アドレスは UDL ネットワークの AS に属するものではなく、BDL として利用する ISP のアドレスを用いる必要がある。

ソースアドレスとして、BDL で接続する ISP のアドレスを用いた場合、戻りのトラフィックも、BDL のアドレス宛てに送信される。そのため、UDL を用いて受信できない問題が発生する。そのため、冗長な経路を通ることになるが、UDL サイトは送信するトラフィックをまず Feeder 宛てにカプセル化して送信する。

図 2.3 に UDLR によりカプセル化するパケットの送信元 IP アドレス、宛先 IP アドレスの構造を示す。このように、まず UDL サイトのホストのアドレスを送信元 IP アドレスとして用いて、宛先に IP パケットを生成し、UDLR によるカプセル化により宛先を Feeder の UDL インターフェイスのアドレスとし、送信元アドレスを BDL の ISP のアドレスとする必要がある。



図 2.3: UDLR によるカプセル化

## 2.3 通信品質

以下の節で、UDL ネットワーク上で通信品質に多大な影響を与える項目について述べる。

### 2.3.1 トンネル

UDLR は Receiver の UDL インターフェイスから送信するパケットをカプセル化して、送信する。以下に、カプセル化するヘッダとそのサイズを示す。

$$14(\text{イーサネットヘッダ}) + 20(\text{IP ヘッダ}) + 8(\text{GRE ヘッダ}) = 42 \text{ バイト}$$

上記に示すように、カプセル化後のパケットサイズは、カプセル化前より 42 バイト大きくなる。Ethernet の MTU(Maximum Transfer Unit) は、1500 バイトである。このため、ペイロードが 1458 バイト以上の IP パケットが UDLR によりカプセル化されるとフラグメントされる。フラグメント処理はスループットを大きく低下させることや、パケット数の増加による帯域の消費を起こす。

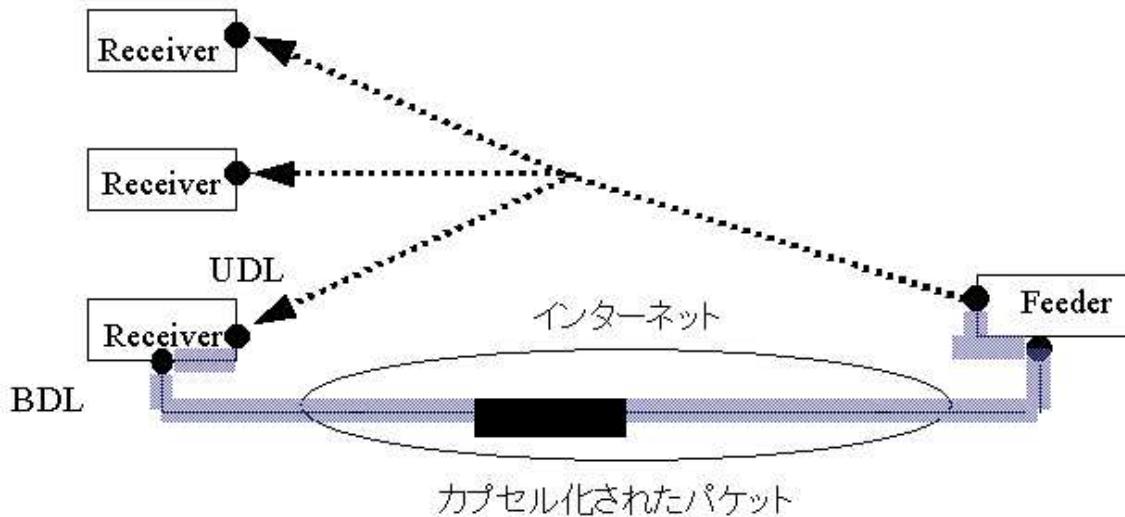


図 2.4: Feeder によって脱カプセル化される

トンネリングされたパケットは、図 2.4 のように Feeder によって脱カプセル化され、目的ホストまで冗長な経路を通る。これにより RTT(Round Trip Time) が増加し、アプリケーションのスループットを低下させる場合がある。TCP は RTT が増加するとスループットが低下する。

また、UDL ネットワークには多くの Receiver が存在することが考えられる。Receiver から送信されるパケットは、トンネルを経由して Feeder に集中するため、脱カプセル化処理のオーバヘッドが大きくなる。規模性を考えた場合、Receiver からトンネル化されるトラフィックはなるべく減らす必要がある。

### 2.3.2 BDL の帯域

UDL を用いたネットワークは、上りと下りの回線の帯域や遅延が非対称である。その特性は、同じように非対称な特性をもつ ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line) と比べても、特に顕著である。このような環境では、送信を利用する地上線の性能によって、下りの広帯域な衛星回線を有効に使えないことがある。UDL からデータを受け取るために、リクエストメッセージや TCP のコントロールパケットを BDL を用いて送信する必要がある。BDL が輻輳すると、UDL によるデータ受信も不可能になる。

図 2.5、図 2.6 に、AI<sup>3</sup> ネットワークの UDL サイトである、インドネシアのブラビジャヤ大学の UDL と BDL のトラフィック流量をそれぞれ示す。グラフは 11 月 7 日から 11 月 8 日までの 1 日のデータである。ブラビジャヤ大学の BDL の帯域は 128 kbps である。また、128 kbps の BDL の回線は UDL サイトのみで使用され、上流 ISP に接続している。

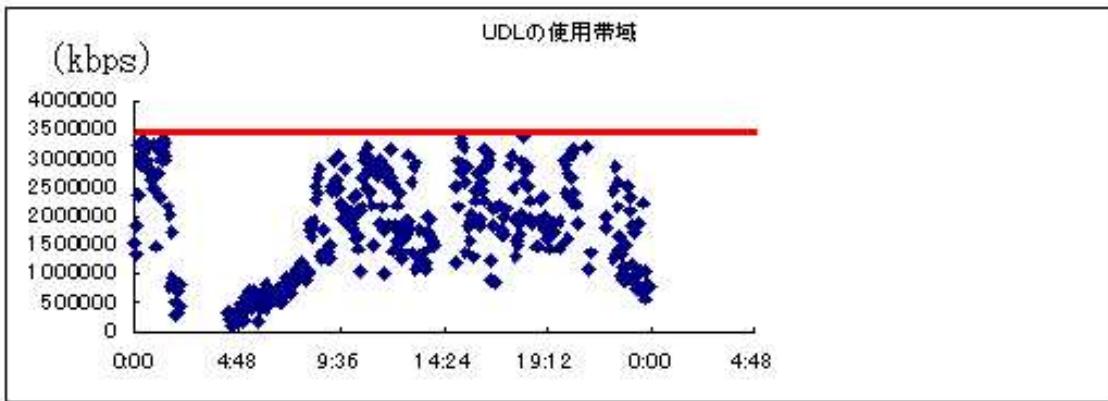


図 2.5: ブラビジャヤ大学の UDL の使用帯域

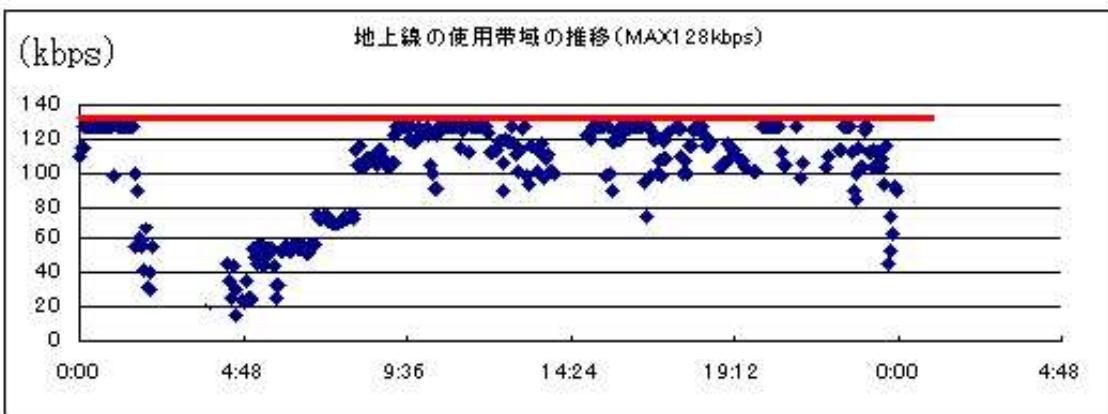


図 2.6: ブラビジャヤ大学の BDL の使用帯域

図 2.6 に示すように、BDL の帯域は占有され、輻輳が発生している。これは、BDL が UDL を利用するためのリクエストメッセージや TCP の ack パケットなどブラビジャヤ大学から送信するトラフィックで占有された例である。ブラビジャヤ大学の UDL サイトでは、本来はより多くの通信要求があるが、BDL が輻輳したために UDL を十分に使用することができない問題が生じている。ネットワークを運用していく上で、通信品質を知っておくことは重要である。それにより、アプリケーションのチューニングならびに、改善策を検討することができるからである。UDL ネットワークでは、ネットワーク管理者は BDL の帯域と、その結果得られる UDL の性能を把握する必要がある。

### 2.3.3 QoS 制御

インターネットでは、リアルタイム性が必要な特定のフローを優先制御し、通信品質を向上される場合がある。しかし、図 2.2 のようなネットワークでは、BDL は他の AS を通る。このような UDL サイトでは、Feeder までの経路のうち自ネットワーク内でしか優先制御を行えない。そのため、UDL サイトから送信するトラフィックを完全に優先制御することが困難である。UDL サイト内で優先制御を行った場合も、BDL 上でパケットロスや遅延が発生すると、効果

がないことが考えられる。

また、既存の QoS 技術はパケット内のヘッダ情報からフローを判別し優先制御を行う。しかし、UDLR によりカプセル化されたパケットはプロトコルが全て GRE(プロトコル番号 47) であり、通常の QoS 技術がフローを判別できない問題がある。

## 2.4 まとめ

以上のように、UDL ネットワークには、既存のネットワークにはない問題点がある。UDL ネットワークの設計、運用にあたって、管理者は以下の要素を考慮する必要がある。

- 行きと返りの経路
- ソースアドレス
- トンネル
- BDL の帯域
- QoS 制御が困難

# 第3章 インターネットにおけるUDLの利用

本章では、UDLR の概要について述べる。また、UDL をインターネットで使うための、その他の解決法について述べる。

## 3.1 UDLの利用

衛星回線を用いる際、機器のコストや運用コストの面から、送信設備よりも受信設備の方が格段に利用しやすいため、個別の受信局に周波数帯域を割り当てるより、ひとつの大きな周波数帯域を割当て、多くの受信局で共有したがほうが、周波数の有効活用にもなる。

このため、衛星回線を少数の送受信可能な局に多数の受信のみ可能な局が接続し、UDL として衛星回線を用いるのが一般的である。

## 3.2 UDLR

### 3.2.1 UDLR の概要

UDLR では、Receiver から Feeder へのパケットを送信する際に、トンネルを使用する。Receiver がカプセル化するパケットは UDL に送信するデータリンクパケットである。

図 3.1 のように、Feeder は Receiver からトンネリングによって受け取ったパケットを脱カプセル化する。

Feeder は自分宛のデータリンクパケットの場合、UDL インターフェイスから受信したパケットとして扱う。他のノードへのユニキャストパケット、マルチキャストパケット、ブロードキャストパケットはそのまま UDL から送信する。このように、Feeder は Receiver から受信したデータリンクパケットを必要に応じて UDL に送信し、UDL 上に仮想的に仮想的なブロードキャストリンクを構築する。

### 3.2.2 UDLR が解決する問題点

UDLR は、UDL をインターネットで用いる場合に生じる以下の 2 つの問題点を解決する。

- データリンクアドレス解決の問題
- 経路制御プロトコルの問題

以下にそれぞれの問題点を詳しく述べる。

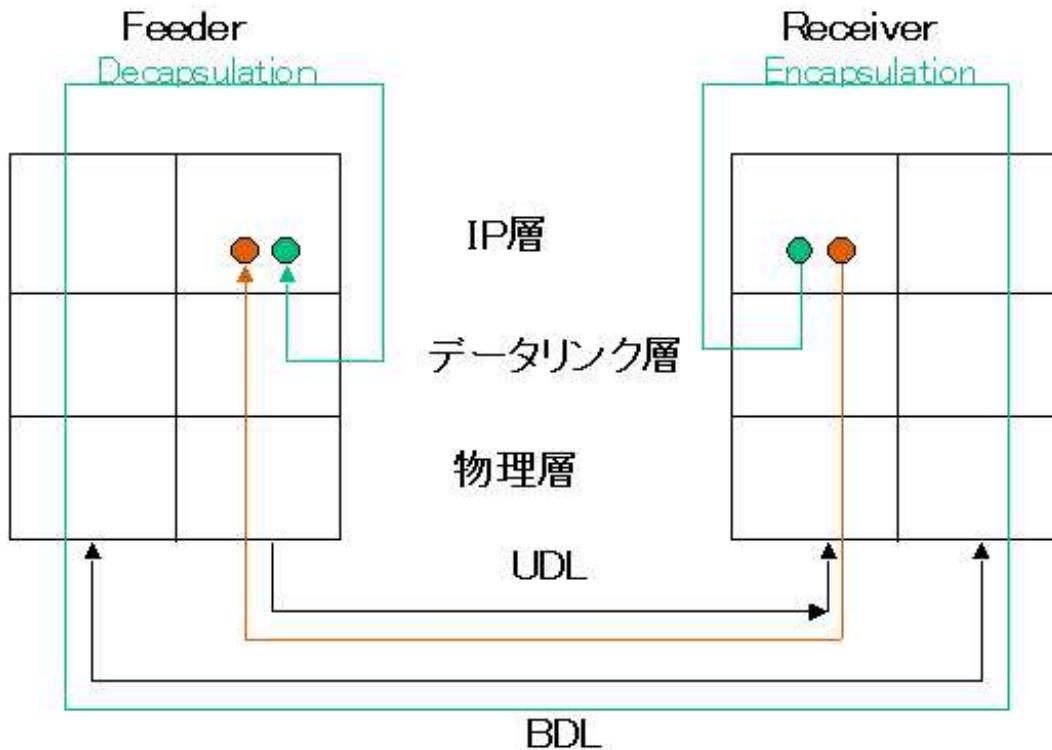


図 3.1: UDLR で用いられるトンネルの概要図

### データリンクアドレス解決の問題

- IPv4 の場合
  - IPv4 では、Ethernet のようなブロードキャストリンクにおけるデータリンクアドレス解決に ARP[5] を用いる。ARP では、アドレス解決を行うノードが ARP request をブロードキャストし、該当ノードが ARP reply を返すことで相手先の MAC address を知る。UDL では、Feeder から ARP request を送信しても、Receiver から ARP reply を返せないため、Feeder は Receiver の MAC address を解決できない。また、Receiver は ARP request を UDL 上に送信できないため、他のノードの MAC address を解決できない。
- IPv6 の場合
  - IPv6 では、データリンクアドレスの解決に NDP[6] を用いる。NDP では、近隣要請メッセージ (Neighbor Solicitation, NS) に対して、近隣応答メッセージ (Neighbor Advertisement, NA) が返信される。NS は近隣要請マルチキャストアドレス宛てに送信され、NA は NS を送信したホストのリンクローカルアドレス宛にユニキャストで送信される。NDP で用いるパケットは、ICMPv6 プロトコルに属しているため、IPv6 ではデータリンクアドレスの解決手法がデータリンクの種類に依存しない。
  - UDL では、Feeder から Receiver に NS を送信した場合、Receiver から NA を返信できない。NA の宛先は Feeder のリンクローカルアドレスであるため、NA は他の

経路を用いて Receiver から Feeder に配送できない。また、Receiver は NA を UDL 上に送信できないため、他のノードのデータリンクアドレスを解決できない。

### 経路制御プロトコルの問題

RIP や RIP2 などの距離ベクトル型の経路制御プロトコルでは、一定時間毎に各ルータが到達可能性情報メッセージを各インターフェイスからマルチキャストする。RIP メッセージを受け取った隣接ルータは、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。

OSPF などの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するルータとの接続性を監視する。OSPF ルータは、それらの接続性を元に自分が持つリンク情報 (LSA) を作成し、経路制御ドメイン全体にフラッディングし、経路情報を伝播させる。

BGP などのパスベクトル型の経路制御プロトコルでは、ルータ間において TCP を用いたセッションを確立する。そのうえで、BGP の基本情報と任意の経路情報を交換する。経路情報に含まれる様々な属性に基づいて最適経路を選択する。同一の宛て先に対して複数の経路が存在する場合、すべての経路のパス属性を比較し、トライフィックを転送するために最も適した経路を決定する。

このように、既存の経路制御プロトコルでは、使用するアルゴリズムに関わらず、隣接するルータと双方方向でメッセージを交換することにより経路計算に必要な情報を取得する。しかし、UDL 上では経路制御プロトコルのメッセージを交換できないため、UDL を経路として選択するように既存の経路制御プロトコルを動作させられない。

## 3.3 その他の解決手法

### 3.3.1 プロキシサーバーを用いた方法

プロキシサーバーを用いる場合、プロキシサーバーやその近傍のサーバが UDL 経由でデータを受信するユーザを管理する。ユーザからのリクエストをプロキシサーバーが受信し、プロキシサーバが目的のデータをインターネットから取得する。その後、UDL を経由してユーザへ目的のデータを配信する。この手法は、プロキシサーバを設置し、クライアントにプロキシを利用する設定をするだけで、ホストは UDL を用いてアプリケーションからのトライフィックを受信できる。しかし、アプリケーション毎にプロキシサーバを設置する必要があり拡張性に乏しい。

### 3.3.2 アドレス変換技術を用いた方法

Receiver がホストの場合、パケット送信用に BDL が必要である。しかし、現在の経路制御機構ではデータの送信に BDL、受信に UDL というふうにホストがインターフェイスを使い分けられない。通常、BDL インターフェイスから送信されるパケットの送信元 IP アドレスは BDL インターフェイスの IP アドレスである。これを受信したホストは、返信を受信したパケットの送信元アドレス宛、つまり Receiver の BDL インターフェイス宛に送信する。この場合、Receiver は戻りの回線に UDL を利用できない。

アドレス変換技術を用いる手法[7]では、ReceiverがBDLを用いてIPパケットを送信する際、送信元アドレスをUDLインターフェイスのIPアドレスに書き換えて送信する。パケットを受信したホストは、パケットの送信元アドレスを宛先アドレスとして用いるので、ReceiverはUDLを経由して戻りのパケットを受信できる。

この技術の問題点として、IPヘッダの内容を書き換えるため、IPSecやDiffservなど各パケットのヘッダを暗号化したり参照する技術と競合する可能性がある。

### 3.3.3 SLCP (Satellite Link Configuration Protocol)

SLCP[8]は、受信ノードを動的に回線提供者(ネットワークプロバイダ)の意図するUDL回線へ割当て、その管理情報によって受信ノードを管理したり、課金するための情報収集等を行う機能を提供する。図3.2にSLCPの概要図を示す。以下にSLCPが管理する情報を述べる。

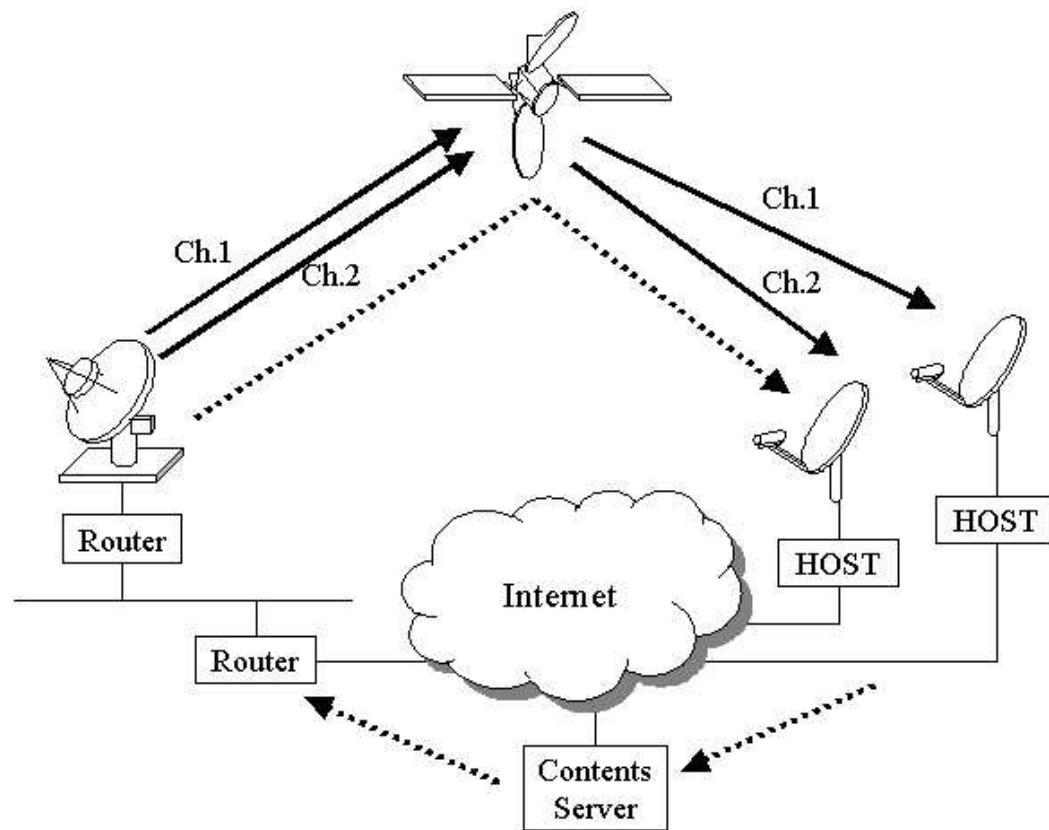


図3.2: SLCPの概要図

- 受信ノードを割当てる回線の種別
- 受信ノードに対して割り当てるIPアドレス
- 受信ノードのUDL側のMACアドレス
- 受信ノードに対して資源を割り当てた時刻

SLCPは、クライアント、サーバーの形態を取る。SLCPサーバは受信ノード(クライアント)の認証を行い、ルールに基づきクライアントノードを指定チャネルに割当て、ルータの ARP テーブルを更新する。SLCPはIP層、データリンク層を改変することなく、IP層以下において片方向回線と双方向回線の差異を吸収する仕組みを提供する。

### 3.4 解決手法の比較

UDLをインターネットで用いる方法として、既存の手法の性質を表3.1に示す。

表3.1: UDLをインターネットで用いるための解決法の比較

解決手法	利用形態	経路制御技術との共存
プロキシサーバ	ホスト接続型	×
アドレス変換	ネットワーク接続型	×
SLCP	ホスト接続型	×
UDLR	ネットワーク接続型	○

UDLをインターネットの回線の一部として利用する形態は、以下の2つである。

- 衛星回線を用いてネットワークをインターネットへ接続するもの(ネットワーク接続型サービス)
- 衛星回線を用いてノードをインターネットへ接続するもの(ホスト接続型サービス)

既存の解決手法を上記のように分類すると、ネットワーク接続型サービスには、アドレス変換を用いた手法、UDLRがあてはまる。ホスト接続型サービスには、プロキシサーバを用いた手法とSLCPがあてはまる。既存の経路制御技術をUDLサイトで利用できるのはUDLRを用いた場合だけである。

アドレス変換を用いた手法では、UDLネットワークは接続するネットワークの末端となり、トラフィックをトランジットしたりすることはできない、また、アドレス変換技術を用いるとマルチキャストパケットをそのままではサイト内で受信したり、送信したりすることはできない。

本研究の目的は、ユニキャスト、マルチキャストの双方において、インターネットの枠組みの中に透過的にUDLを組み込んだネットワークを構築することである。そのため、本研究ではUDLRを用いた手法を対象にする。

# 第4章 本研究のアプローチ

## 4.1 ネットワーク設計

本研究では、ネットワークを設計するためには、以下が重要であると考える。

- ネットワークの要件定義
  - 最初に構築するネットワークをどのような目的に用いるのか明確に定義しておく必要がある。
- ネットワーク構成の検討
  - 受信局を設置した地点の LAN をどのようなトポロジで作るのか検討する必要がある。また、どの単位を一つの AS として、IP アドレスをどのように割当て、AS 内の IP 経路制御はどのような方法で行うのかということも検討する必要がある。さらに、AS 間の接続点をどこにし、どのように経路情報の交換、広告を行うか検討する必要がある。
- 複数ユーザでの利用形態の検討
  - ネットワーク内には、複数のユーザが存在する。帯域の占有は、複数のユーザの存在によって起こる。回線の帯域が占有されると、輻輳が発生し、利用するアプリケーションのスループットは著しく低下する。ユーザからネットワーク内からどういったトラフィックが送信され、また受信されるのか検討しておく必要がある。

## 4.2 本研究の注目点

本研究では、今後 UDLR により UDL を用いて、インターネット上に様々な UDL ネットワークを構築していくことを目的する。そのため、2 章で述べた UDL ネットワークを設計、運用していくまでの問題点を基に、UDLR を用いて UDL ネットワークを設計していくために、以下の 3 つの項目を行う。

- $AI^3$  UDL ネットワークの利用分析
- UDL ネットワークの構成
- UDL サイトの性能測定

### 4.3 $AI^3$ UDL ネットワークの利用分析

UDL を用いてネットワークを構築している  $AI^3$  ネットワークの利用分析を行う。ネットワークの利用形態の分析は、ネットワークを安定運用する上で必須である。実際に利用されているネットワークを分析することにより、机上の理論では想像できなかった、性質を知ることがある。また、インターネットの挙動を日々監視し、その詳細な動作やトラフィックの増減の傾向を知ることにより、ネットワークに異常が生じた場合にこれを迅速に探知・復旧することや、将来のネットワーク構成の改善を検討することができる。また、得られたデータは他のネットワークを設計する際にも、有効なデータとなる。そこで、本研究では、ネットワークのデータ分析基盤を  $AI^3$  UDL ネットワークに構築し、収集したデータの分析を行う。分析結果は、 $AI^3$  ネットワークの安定運用につなげるだけでなく、今後、新たに UDL ネットワークを設計していく際に重要な指標としていく。

分析では、実際に利用されているプロトコルとトンネルによる影響を考察する。これにより、実際ネットワーク上で利用されている UDL ネットワークの性質を分析し、把握する。

### 4.4 UDL ネットワークの構成

UDL ネットワークでは、UDLR によるパケットのカプセル化の影響などで通信品質が低下することを第二章で述べた。UDL を用いて、インターネットへの接続性を提供するだけなら、そのような影響を気にする必要はない。しかし、適切にネットワークを設計、運用していくためには、UDLR のカプセル化の影響を考慮に入れる必要がある。

UDL ネットワークでは、ネットワーク構成、経路制御プロトコルごとにトンネルに流れるトラフィックを抑制し、UDL を有効に用いるための設定方法が異なる。BDL のみを用いるネットワークと異なるネットワーク構成法が必要となる。

本研究では、UDL ネットワーク上での Feeder と Receiver の関係を整理する。具体的には、以下の 3 つに分類する。

- Feeder と Receiver が同一 AS 内に存在
- Feeder と Receiver が異なる AS に存在し、Feeder と Receiver で AS 間接続
- Feeder と Receiver が異なる AS に存在し、UDL によるトンネルにより、Feeder と Receiver が接続

上記の Feeder と Receiver の関係に注目し、ユニキャスト、マルチキャストごとに UDL を用いたネットワーク構成を整理し、それぞれのネットワークに対して UDL を有効に用いるためのネットワーク構築手法を述べる。

### 4.5 UDL サイトの通信品質

現在まで、UDL をインターネットの一部として用いる機関の研究開発に主眼がおかれ、UDL ネットワークの性能分析は十分に研究されていない。ネットワークを運用していく上で、ネットワークの通信性能による特性を把握することにより、問題点を切り分け、改善策を講じることができる。また、ネットワーク設計の段階で、有効な指針となる。

UDLサイトでは、BDLの帯域が占有してしまい、本来UDLの帯域を更に使用したいのだが、BDLの限界により使用できない状況が発生する場合がある。このような状況により、アプリケーションのスループットが低下しても、ネットワークの性質による限界なのか、他の何かしらのトラブルが発生しているのか区別することはできない。しかし、UDLの帯域とBDLの帯域が明確になっていると、問題を切り分け、利用する帯域によって、BDLの回線を設計できる。

また、このデータよりUDLの帯域中でユニキャストトラフィックには使用されない、余剰の帯域幅を推定できる。これにより、マルチキャストによる放送型のアプリケーションを利用する場合に、ユニキャストの通信に影響を与えない範囲で利用できるUDL上の帯域幅が分かる。

本研究では、複数ユーザの利用を想定し、AI<sup>3</sup>ネットワークにおけるUDLの利用分析を踏まえて、シミュレーションによりBDLとUDLの関係をモデル化する。

# 第5章 $AI^3$ における UDL の利用分析

本節では、AI3 ネットワークにおける UDL の利用分析結果を述べる。

## 5.1 $AI^3$ ネットワーク

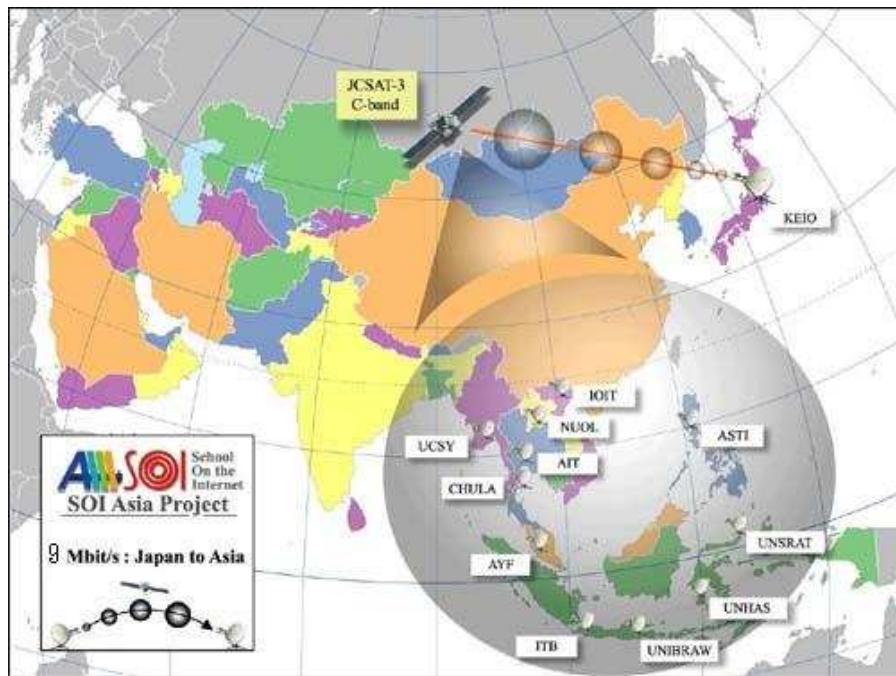
### 5.1.1 概要

$AI^3$  プロジェクトは、衛星回線を用いたインターネット技術や国際バックボーンの研究を目的としたテストベッドを構築している。1995年から開始され、WIDE プロジェクト [9] が中心となり、東南アジアの共同研究組織(以下パートナー)と接続している。 $AI^3$  ネットワークでは、C-band と Ku-band の二つの周波数帯の衛星回線を用いている。C-band のハブ局は慶應大学湘南藤沢キャンパス(Shonan Fujisawa Campus、以下 SFC)に置かれ、Ku-band のハブ局は奈良先端技術大学院大学(Nara Institute of Science and Technology、以下 NAIST)に置かれている。

### 5.1.2 ネットワークトポジ

C-band、Ku-band それぞれに衛星回線を point-to-point 回線(以後 p2p)に用いて接続するパートナーが存在する。C-band ではマレーシア、フィリピン、ベトナム、シンガポールの大学が接続し、Ku-band ではインドネシア、タイの大学が接続している。 $AI^3$  は AS を取得しているパートナーと BGP 接続を行っている。

この他に、C-band では衛星回線を UDL として用いる研究が行われており、UDL で接続する UDL パートナーが存在する。P2P 回線で接続するパートナーは、P2P 回線と UDL 回線の両方で接続されている場合もある。P2P 回線と UDL 回線の両方で接続しているパートナーは、トラフィックの種類によって、P2P 回線に流れるトラフィックを UDL 回線のほうへ振り分けている。 $AI^3$  UDL ネットワークの概観図を図 5.1 に示す。SFC と NAIST は 100Mbps の広域イーサネットで接続している。

図 5.1:  $AI^3$  UDL ネットワークの全体図

$AI^3$  ネットワークのパートナー情報を表5.1に示す。国名、サイト名(略称)、接続形態、パートナーサイトへの回線の帯域、対外線の帯域の項目でまとめる。NuolはSFCと64Kbpsの衛星回線で接続されている。Unsrat, Ucsyはダイアルアップ回線をBDLとして使用し、SOI-ASIAの授業時のみ接続している。

表 5.1:  $AI^3$  UDL サイト

サイト名(略称)	国	接続形態	パートナーへの帯域	対外線の帯域
AIT	タイ	P2P(Ku), UDL	1.5Mbps, 9Mbps	512kbps
ITB	インドネシア	P2P(Ku), UDL	2Mbps, 9Mbps	1.5Mbps
ASTI	フィリピン	P2P(C), UDL	1.5Mbps, 9Mbps	512Kbps
IOIT	ベトナム	P2P(C), UDL	1.5Mbps, 9Mbps	512Kbps
USM	マレーシア	P2P(C)	1.5Mbps	512Kbps
TP	シンガポール	P2P(C)	1.5Mbps	512Kbps
Nuol	ラオス	P2P, UDL	9Mbps, 64kbps	64 Kbps
Brawijaya	インドネシア	UDL	9Mbps	128Kbps
Unhas	インドネシア	UDL	9Mbps	33.6Kbps
Ayf	マレーシア	UDL	9Mbps	11.5Mbps
Chula	タイ	UDL	9Mbps	4.5Mbps
Unsrat	インドネシア	UDL	9Mbps	128Kbps
Ucsy	ミャンマー	UDL	9Mbps	Kbps

## 5.2 $AI^3$ UDL ネットワークのトラフィック分析

本節では、 $AI^3$  UDL Traffic Repository を用いて、UDL ネットワークを分析した結果について述べる。

### 5.2.1 $AI^3$ UDL Traffic Repository の設計と実装

現在、IP トラフィックの解析のためには、ネットワークの負荷を監視する手法が多く用いられている。現在、IP トラフィック解析によく利用されているツールは MRTG [11] などがある。MRTG では、SNMP [12] を利用してトラフィックデータを収集し、グラフ化するツールである。ネットワークの負荷を監視する目的にもっとも多く利用されている。

しかし、より正確に IP トラフィックを解析するためには、ネットワークの負荷だけでなく、その他の情報も併用すべきである。ネットワークを設計する段階では、どのような要因により帯域が占有され、スループットが低下するのかしっておく必要がある。また、トンネルによる帯域の占有を解析する必要がある。そこで、本研究では、UDL ネットワーク上に流れているプロトコル、パケット数、パケットサイズに注目した。 $AI^3$  UDL Traffic Repository では、tcpdump [13] によってトラフィックを収集した。

収集したデータは libpcap ライブリ [14] を用いて解析を行い、rrdtool [15]、gnuplot [16] を用いて視覚化した。

### 5.2.2 $AI^3$ UDL サイトの構成法

表 5.1 で、P2P の回線を保持するサイトは、P2P 回線を BDL として用いている。P2P 回線を保持するサイトでは、UDL と BDL は同じ AS に属するため、デフォルト経路は BDL の方に向いている。一方、他の UDL サイトは BDL 回線として、 $AI^3$  とは別の AS に属する回線を用いているため、UDL サイト内の Receiver はデフォルト経路は UDL の方に向いている。そのため、UDL サイトから送信されるトラフィックはすべての GRE でカプセル化されて、SFC の Feeder に到着する。

### 5.2.3 各パートナー毎のトラフィック

図 5.2 は、 $AI^3$  の UDL ネットワークに接続している九サイトの半年間のトラフィック流量である。

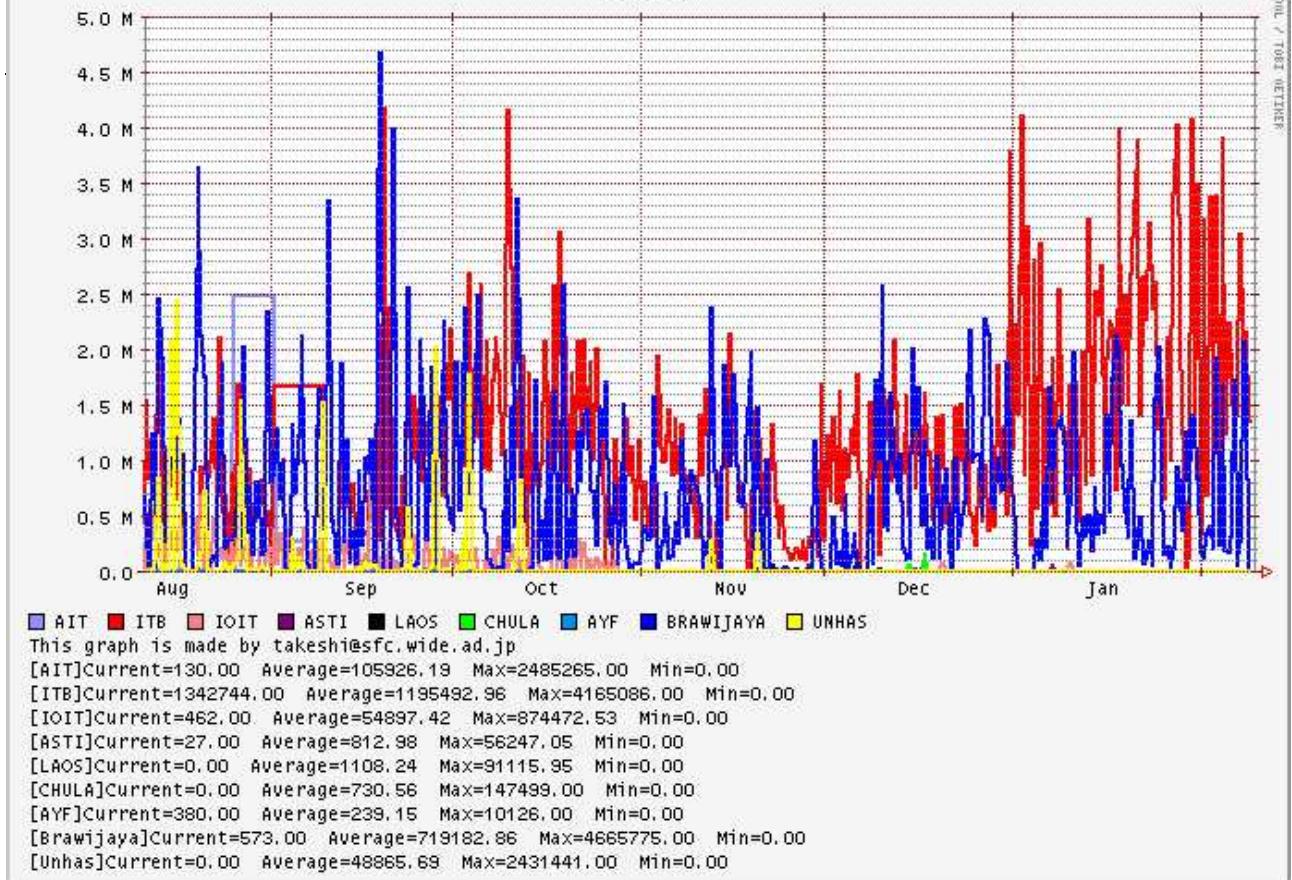


図 5.2: 各々サイト毎のトラフィック

各サイト毎にネットワークの利用形態は異なる。遠隔授業などのイベントだけ UDL を用いるサイトが多いが、Brawijaya,ITB,Unhas は日常的なトラフィックを UDL を使って受信している。UDL の帯域は 11 月 14 日までは 6Mbps であり、現在は 9Mbps に拡張されている。

#### 5.2.4 コモディティトラフィックとマルチキャストトラフィック

UDL は複数のサイトで共有する回線である。共有されている UDL 上に流れるトラフィックを分類して、モニタリングを行った。

図 5.3 は、UDL に流れるトラフィックを SOI-ASIA の授業で使われるトラフィック、P2P 回線をもつパートナーに流れるトラフィック、UDL サイトへ流れる SOI-ASIA の授業以外のトラフィックに分類している。

黄色い帯は SOI-ASIA の授業で使われるマルチキャストトラフィックである。定常的に 0.5Mbps ほどマルチキャストトラフィックが流れている。青い帯は、UDL サイト内で SOI-ASIA の遠隔授業以外の用途に使われているトラフィックである。これをコモディティトラフィックと呼ぶ。コモディティトラフィックは一般に TCP プロトコルのトラフィックである。

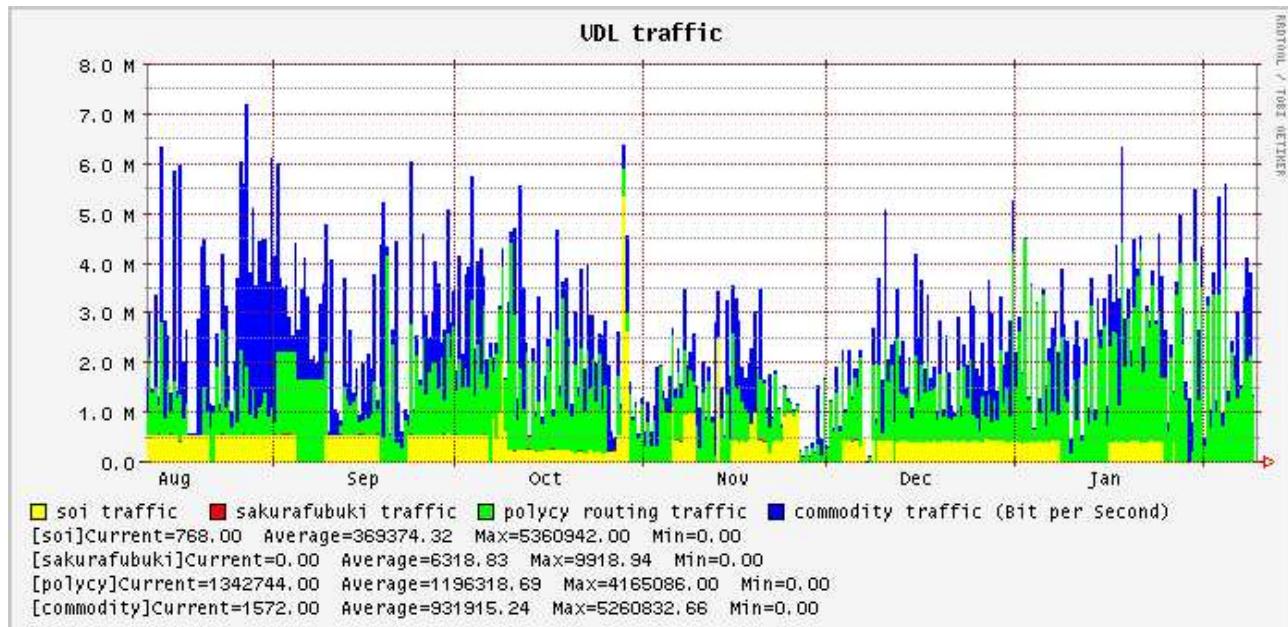


図 5.3: UDL に流れるコモディティトラフィックとマルチキャストトラフィック

コモディティトラフィックは一般に TCP プロトコルのトラフィックである。一般に UDP と TCP のトラフィックは競合すると、UDP のスループットは低下する。そのような状況を防ぐため、コモディティトラフィックとマルチキャストトラフィックを監視している。

### 5.2.5 UDL サイトへのトラフィック

以下に、UDL をよく使用している ITB、Brawijaya、Unhas のトラフィック内容について述べる。

図 5.4 は 2003 年 10 月 7 日の Brawijaya のトラフィックである。図 5.5 はパケットサイズの分布である。図 5.5 のグラフでは、packets と示されたグラフはあるサイズをもつパケットの総数を相対累積度数 (Cumulative Percentage) で表したもである。また、bytes と示されたグラフは、同じサイズをもつパケットの総 byte 数を相対累積度数を表している。なお、パケットサイズにはデータリンクヘッダは含まれている。

図 5.6 は Brawijaya の全トラフィック中で割合が高いものを示す。

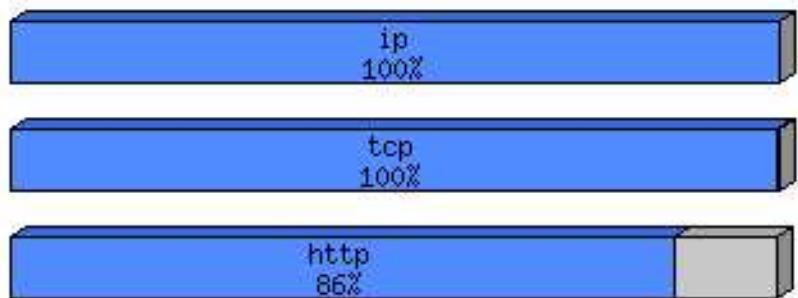


図 5.4: Brawijaya のトラフィック

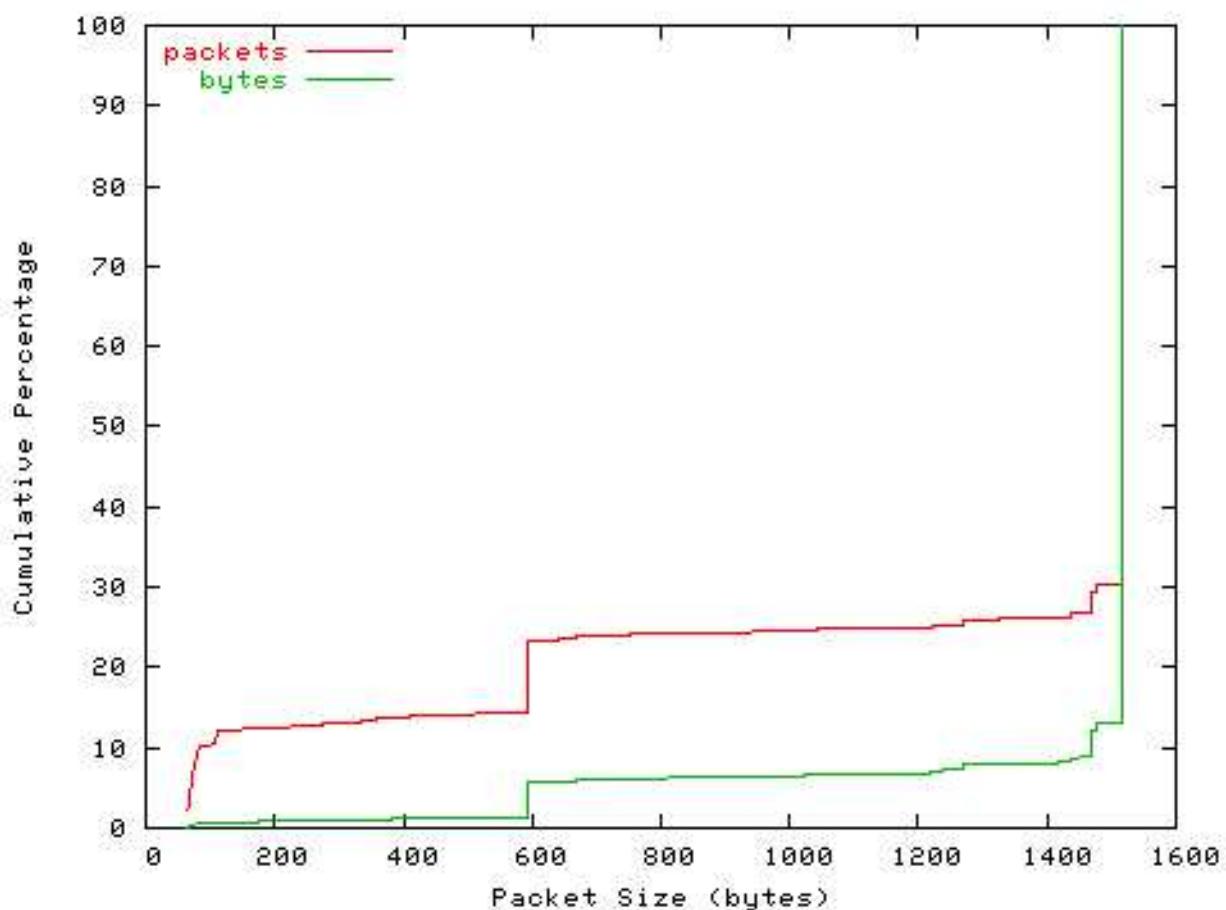


図 5.5: Brawijaya のパケットサイズの分布

protocol	packets	bytes	bytes/pkt
<hr/>			
http(s)	3571107 ( 84.44%)	4451495871 ( 86.48%)	1246.53
http(c)	15954 ( 0.38%)	1382756 ( 0.03%)	86.67
squid	956 ( 0.02%)	1037839 ( 0.02%)	1085.61
udp	9411 ( 0.22%)	1372571 ( 0.03%)	145.85

図 5.6: Brawijaya が受信する主なトラフィック

図 5.7 は、2003 年 10 月 7 日の Unhas のトラフィックである。図 5.8 は、この同時刻のパケットサイズの分布である。図 5.9 は Unhas が受信する主なトラフィックを示す。

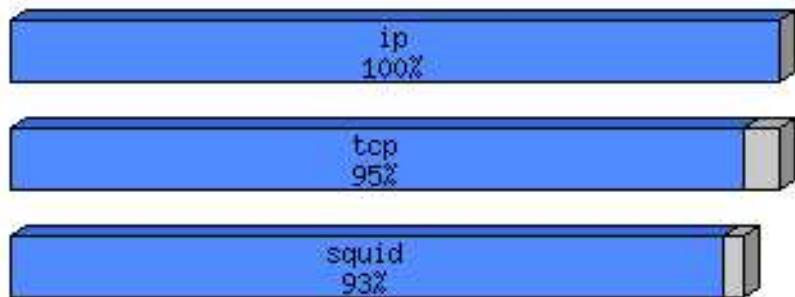


図 5.7: Unhas のトラフィック

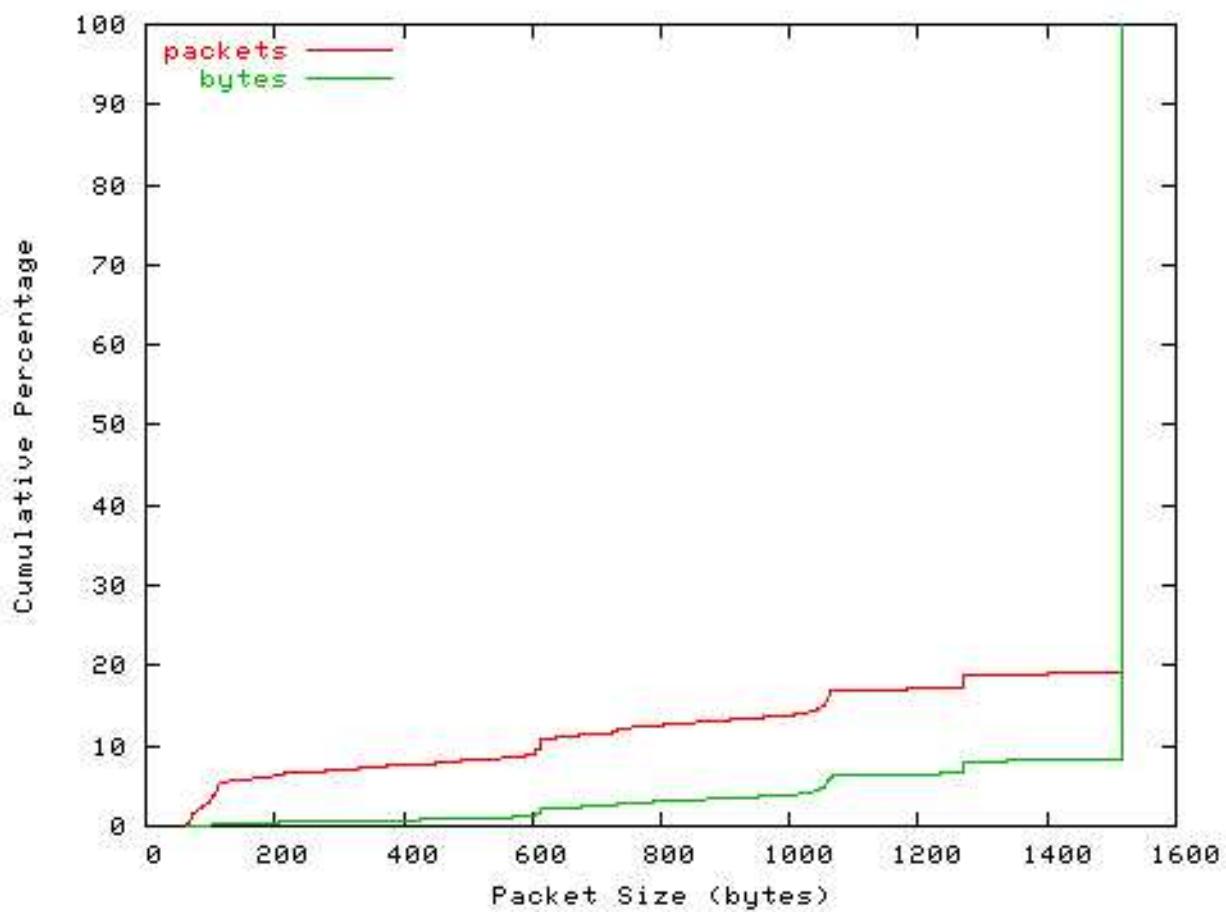


図 5.8: Unhas のパケットサイズの分布

protocol	packets	bytes	bytes/pkt
<hr/>			
http(s)	24540 ( 2.73%)	30690733 ( 2.55%)	1250.64
http(c)	683 ( 0.08%)	46116 ( 0.00%)	67.52
squid	775837 ( 86.33%)	1117121368 ( 92.73%)	1439.89
udp	73808 ( 8.21%)	52620128 ( 4.37%)	712.93

図 5.9: Unhas が受信するトラフィック

図 5.10 は、2003 年 10 月 7 日の ITB のトラフィックである。図 5.11 は、同時期のパケットサイズの分布である。図 5.12 は ITB が受信する主なトラフィックである。

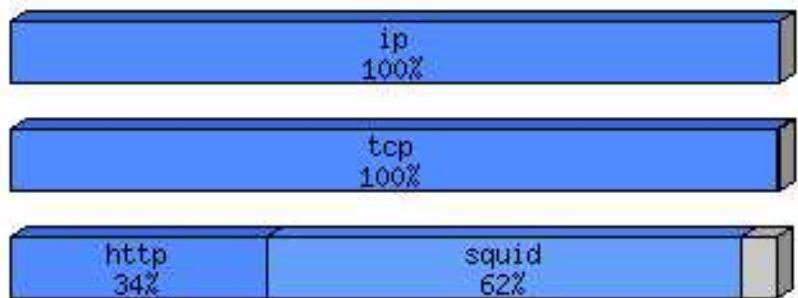


図 5.10: ITB のトラフィック

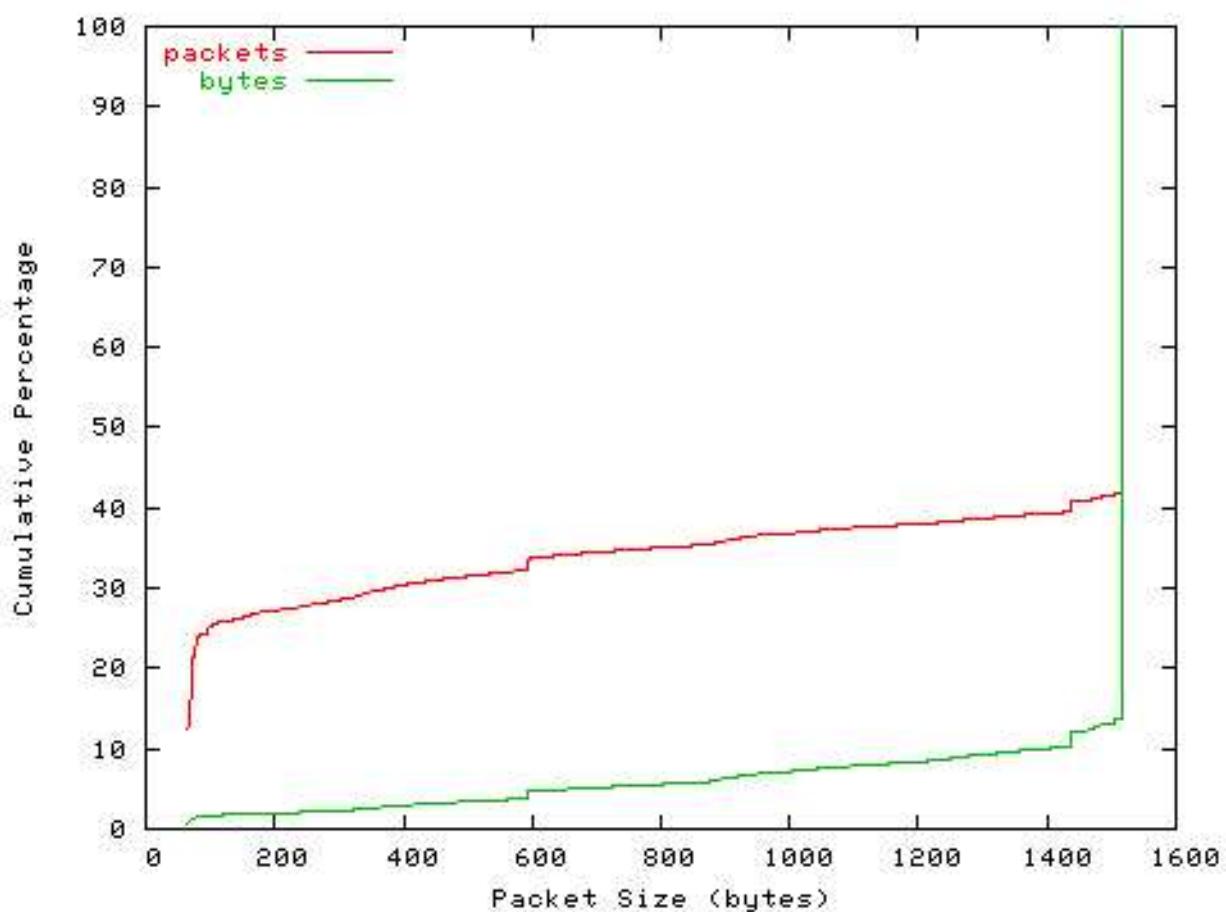


図 5.11: ITB のパケットサイズの分布

protocol	packets	bytes	bytes/pkt
<hr/>			
http(s)	6475446 ( 38.35%)	5781856119 ( 33.50%)	892.89
http(c)	11710 ( 0.07%)	821052 ( 0.00%)	70.12
squid	9023550 ( 53.44%)	10654677233 ( 61.73%)	1180.76
smtp	1184786 ( 7.02%)	593070648 ( 3.44%)	500.57
udp	3134 ( 0.02%)	512944 ( 0.00%)	163.67

図 5.12: ITB が受信する主なトラフィック

上の 3 つのサイトでは、HTTP トラフィックが多くの割合を占める。また、パケットサイズの分布は、1400 バイト以上の大きなパケットが約 70 %ほど占めており、サイズが小さなパケットは少ないことがわかる。ただ、Brawijaya では、600 バイトのパケットを多数受信していることがわかった。SFC では、キャッシングサーバを設置しており、UDL パートナーをこのサーバを直接キャッシングサーバとして利用したり、自サイトにキャッシングサーバを構築し、親子関係を構築したりすることができる。ITB、Unhas では、squid[17] による WWW キャッシュを利用しておらず、UDL の帯域利用効率を向上させている。特に Unhas では、多くのキャッシングトラフィックを受信していることがわかる。一方、ITB では http トラフィック、squid によるキャッシングトラフィックそれぞれがが流れている。

### 5.2.6 UDL サイトからのトラフィック

次に、UDL サイトからのトラフィックの流量について述べる。図 5.13、図 5.14、図 5.15 は、2003 年 12 月 20 日に、各 UDL サイトから Feeder にトンネリングされたパケットを脱力プロセラ化した後のパケットサイズの分布である。

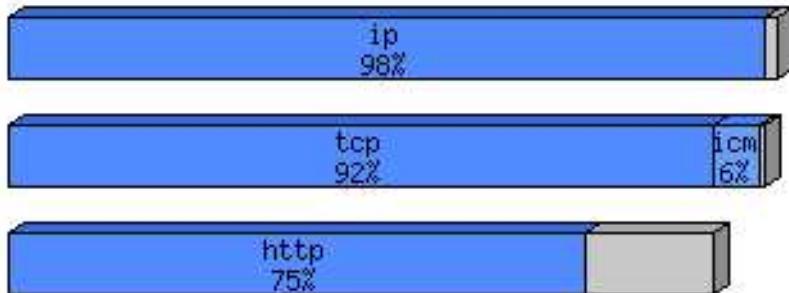


図 5.13: Feeder へのトラフィック

	protocol	packets	bytes	bytes/pkt
http(s)		116714 ( 4.09%)	11190322 ( 3.44%)	95.88
http(c)		2181306 ( 76.51%)	244353178 ( 75.21%)	112.02
squid		4483 ( 0.16%)	624715 ( 0.19%)	139.35
smtp		11 ( 0.00%)	748 ( 0.00%)	68.00
udp		13743 ( 0.48%)	1964116 ( 0.60%)	142.92
ip6		50568 ( 1.77%)	5297665 ( 1.63%)	104.76

図 5.14: UDL サイトからが送信される主なトラフィック

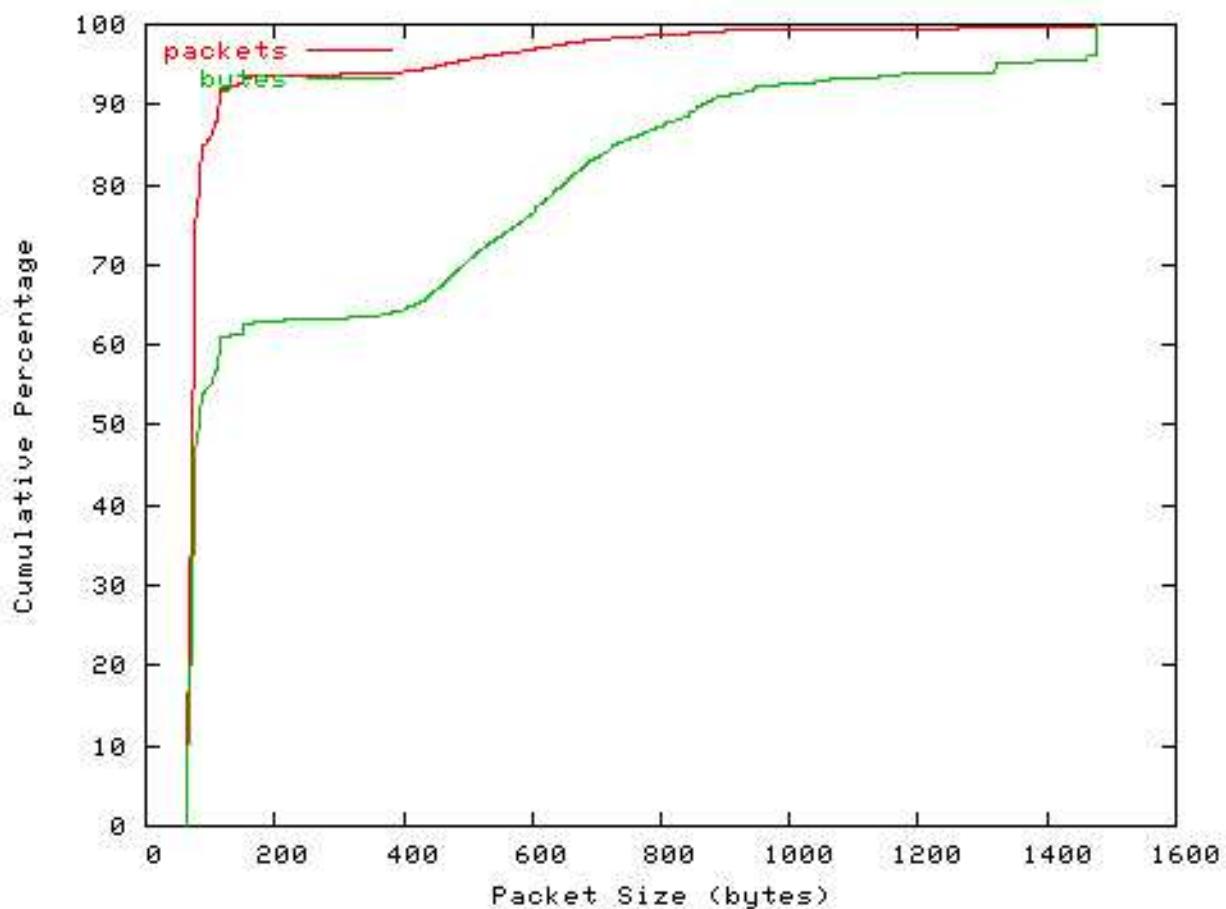


図 5.15: Feeder へのパケットサイズの分布

現在のところ、UDL サイトから送信されるトラフィックの多くは HTTP のリクエストメッセージである。また、図 5.15 から、約 90 %が 200 バイト以下のパケットである。以上から、UDL サイトから流れているトラフィックは http のリクエストメッセージと TCP の ACK パケットが多く、サイズが小さいパケットの流量が多いことがわかる。

### 5.2.7 トンネルの影響

#### カプセル化されたパケット

図 5.16 は、2003 年 12 月 20 日に Feeder へトンネリングされた GRE パケットのサイズの分布である。

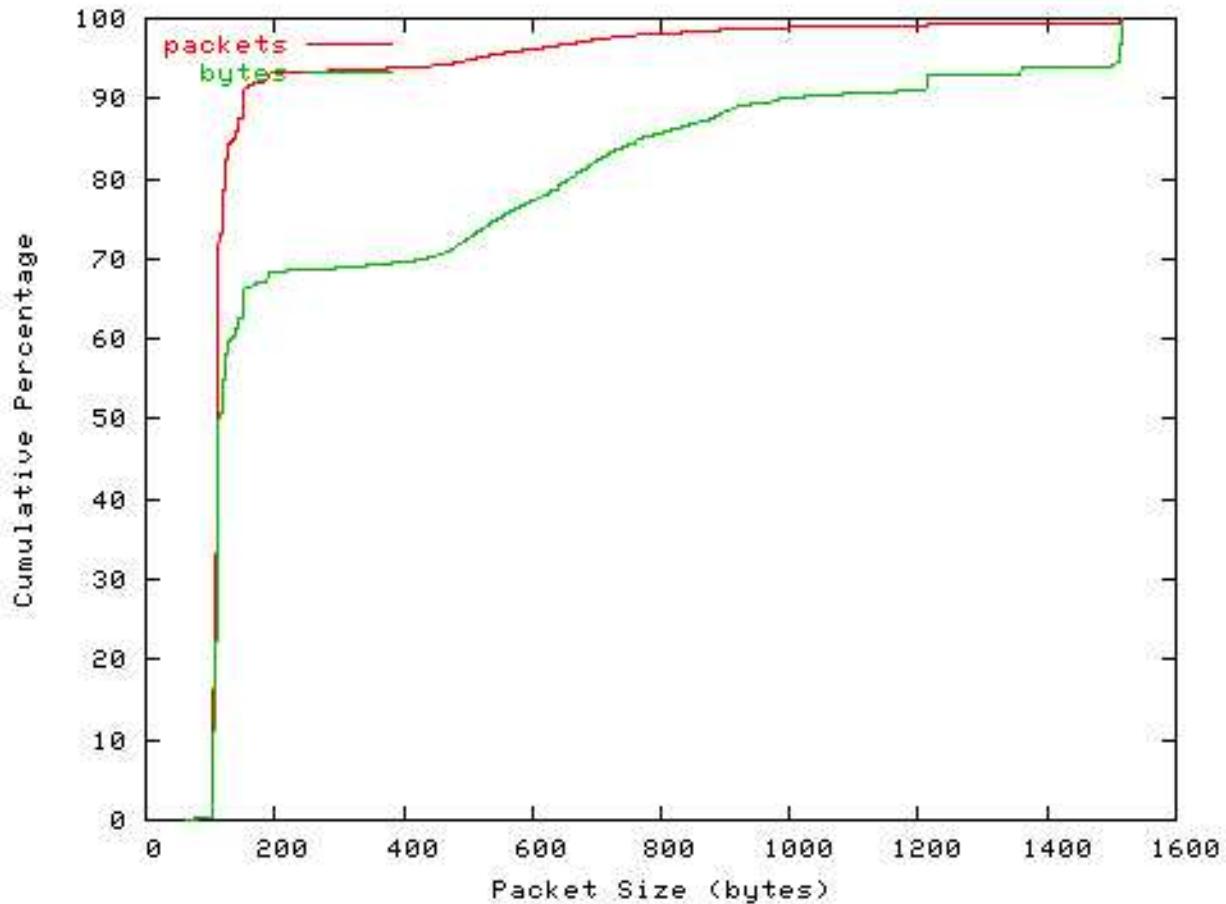


図 5.16: Feeder へ送信された GRE パケットのパケットサイズの分布

図 5.15 と比べると、GRE によるカプセル化分 (42 バイト) パケットサイズが大きくなっている。

次に、UDLR によるカプセル化で発生するパケットのフラグメントについて考察する。Receiver は 1458byte 以上のパケットを送信する場合、パケットを分割して Feeder まで配達する。Feeder では、Receiver から分割されたパケットを受信すると、GRE を脱カプセル化後、パケットを結合して配達する。よって、UDL サイトから Feeder に到着したパケット数と Feeder が脱カプセル化後に送信するパケット数を比較することにより、Receiver によるフラグメントの動作を知ることができる。

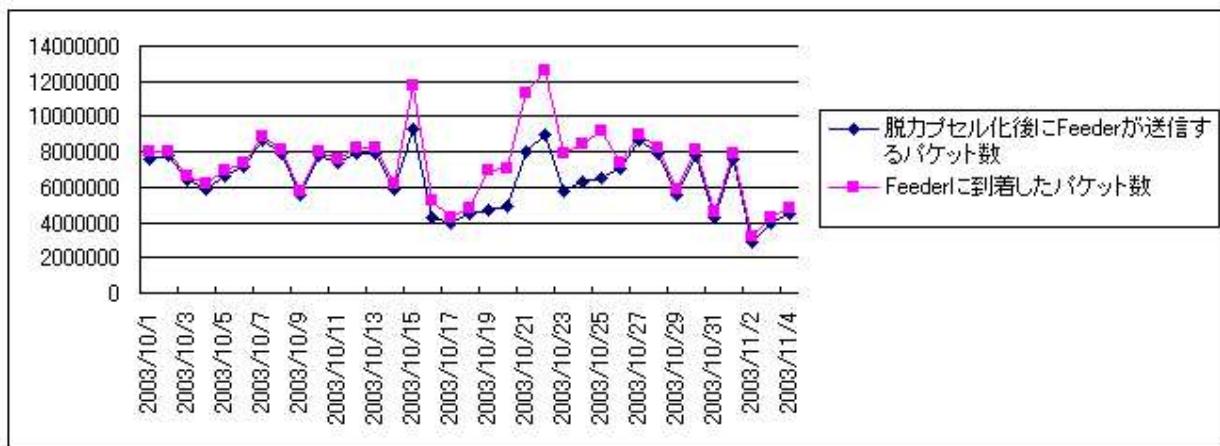


図 5.17: Feeder に到達したパケットの総量と Feeder により脱力プセル化後に送信したパケットの比較

図 5.17 は 2003 年 10 月 1 日から 2003 年 11 月 4 日までに、UDL サイトから Feeder に到着したパケット数、脱力プセル化後 Feeder が送信するパケット数を一日単位でグラフ化したものである。グラフより、Receiver より分割されて送信されたパケットは少数だと言える。これは、そもそも UDL サイトから送信されるパケットはアプリケーションのリクエストメッセージや TCP の ack などのパケットサイズが小さいもので、フラグメントする必要がないからである。しかし、10 月 22 日、23 日間では、Receiver によりフラグメントされたパケットがたくさん送信されている。このような状況では、ネットワークへの負荷は大きい。

### トンネルによる帯域の消費

以下の図 5.18 に、Feeder に到達したパケットサイズの総量 (*Megabyte*) と Feeder により脱力プセル化されたパケットのパケットサイズの総量を示す。また、GRE によりカプセル化されることにより、どれだけ帯域を消費されるのか検討するために、カプセル化されたパケットの総量と脱力プセル化後の比率を算出した。

Feeder に到達するパケットは、64 バイトが多く、この大きさは TCP の ack パケットなど Ethernet で送受信される最小パケットサイズである。各パケットが UDLR によりカプセル化され 42 バイトずつ大きくなると、帯域の消費も増える。図 5.18 は 11 月 18 日から 12 月 22 日までに 1 日単位で、UDL サイトから Feeder に到達したパケットのサイズの総量と Feeder が脱力プセル化して、送信したパケットのサイズ総量を比較したものである。

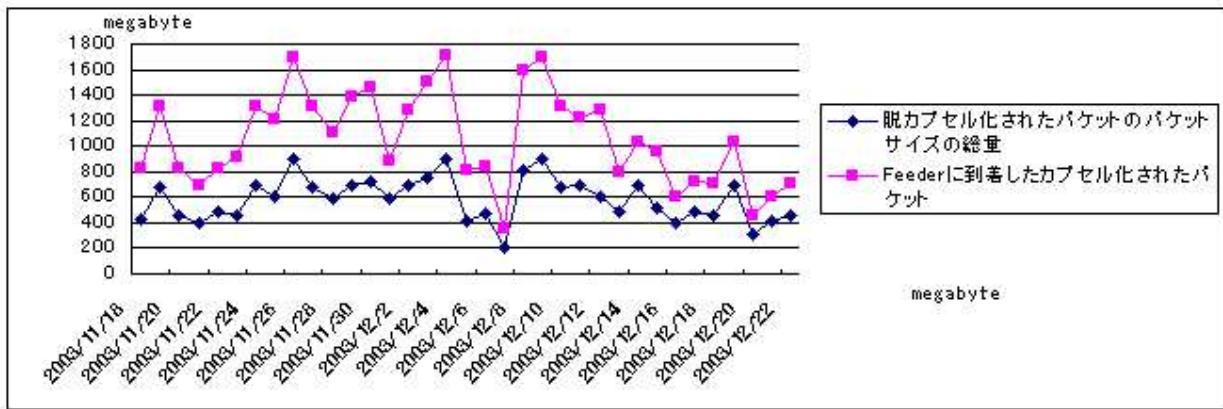


図 5.18: Feeder に到達したパケットサイズの総量と Feeder により脱カプセル化されたパケットのパケットサイズの総量

図 5.19 からカプセル化されたパケット、脱カプセル化されたパケット総量の比較をおこなった。UDL サイトからのトンネリングを用いたトラフィックは、トンネルを用いない場合より約 150%から 200%の帯域を消費していることがわかる。

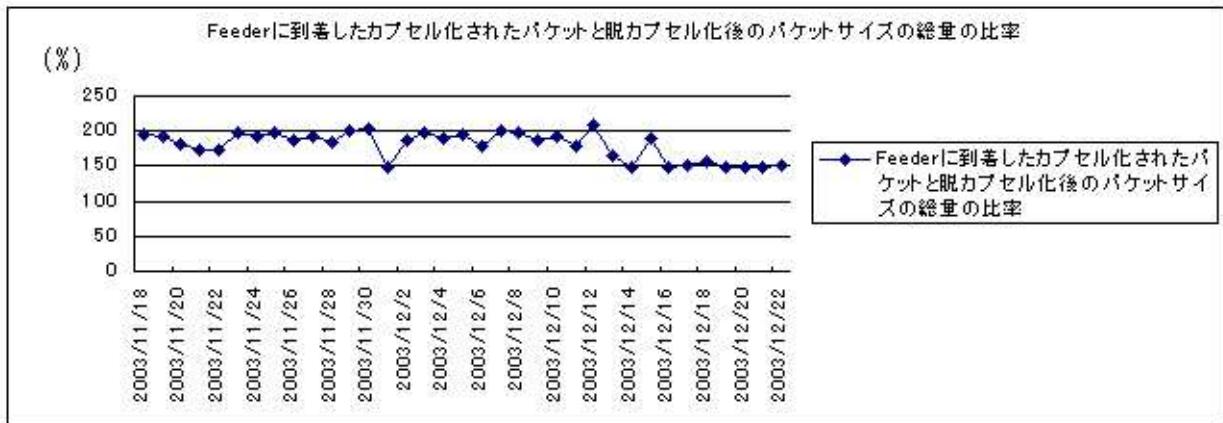


図 5.19: カプセル化されたパケット、脱カプセル化されたパケット総量の比較

### 5.2.8 まとめ

本章では、 $AI^3$  の UDL ネットワークにおける利用分析を述べた。UDL に流れるトラフィック、UDL サイトから BDL を通って送信されるトラフィックの流量は非対称であり、さらにトラフィックのパケットサイズも大きく異なっている。

時には、UDLR のカプセル化により生じるフラグメントがネットワークに負荷をかけることがあることがわかった。また、Feeder に到着したトラフィックは、トンネリングにより、トンネリングを用いない場合の約 150%から 200%の帯域を消費していることがわかった。これにより、UDL ネットワークでのトンネルによるオーバーヘッドが大きいことが言える。

図 2.5、図 2.6 が示すように、Brawijaya では UDL の利用率に対して BDL の帯域が十分でない。 $AI^3$  ネットワークでは、UDL サイトの利用効率を考えたネットワーク設計は十分に行

われていないと言える。

また、UDLサイトにより、どれくらいコモディティトラフィックが利用されるのか想定できない。よって、SOI-ASIAの授業などで利用するマルチキャストトラフィックをどれくらい流していくのか検討することができない。マルチキャストトラフィックを配信する場合、ユニキャストトラフィックと競合しないように配信する必要があるからである。

今後は、各サイトのネットワーク環境、使用するアプリケーションを考慮にいれつつ、UDLを有効に使えるようにネットワークを最適化する必要がある。

# 第6章 UDLを用いたネットワーク構成法

## 6.1 本章の方針

本章では、UDL ネットワークにおける Feeder, Receiver の関係を整理し、その構成毎に最適なネットワーク構成法を提案する。ユニキャスト、マルチキャストそれぞれに対して、種々の制約条件の中で UDL を用いて、トラフィックを受信する適切なネットワーク構成を提案する。受信サイトから送信されるトラフィックがトンネリングされることを抑制する。また、既存の経路制御技術以外に、トラフィックの振り分けなど UDL の特性上有効なネットワーク構成を述べる。

## 6.2 ユニキャスト経路制御

### 6.2.1 UDL、BDL 隣接型

ネットワーク構成

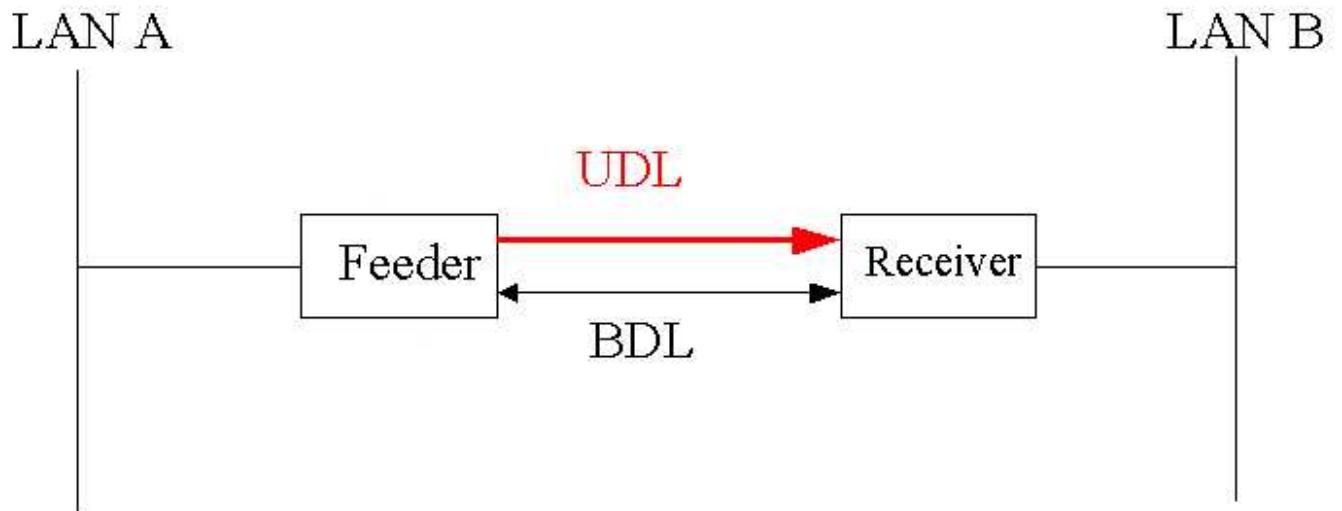


図 6.1: UDL、BDL 隣接型のトポロジ図

あるルータ間に図 6.1 のように UDL と BDL の両方が存在する。Feeder から Receiver へのトラフィックは UDL を経由し、Receiver から Feeder へのトラフィックは、トンネリングされず BDL を経由するように経路設定をする。

## 運用方法

- 静的な経路制御をする場合、Feeder は LAN B への経路を UDL 向きに設定し、Receiver は LAN A への経路は BDL 向きに設定する。UDLR によるトンネルには、ARP だけが流れる。
- 動的経路制御をする場合、Feeder は UDL よりも BDL のコストやメトリックを高く設定する。Receiver は BDL よりも UDL のコストやメトリックを高く設定する。この設定により、余計なトラフィックがトンネルに流れることなく、UDLR によるトンネルには、ARP と経路制御プロトコルメッセージだけが流れる。

### 6.2.2 コスト制御型

#### ネットワーク構成

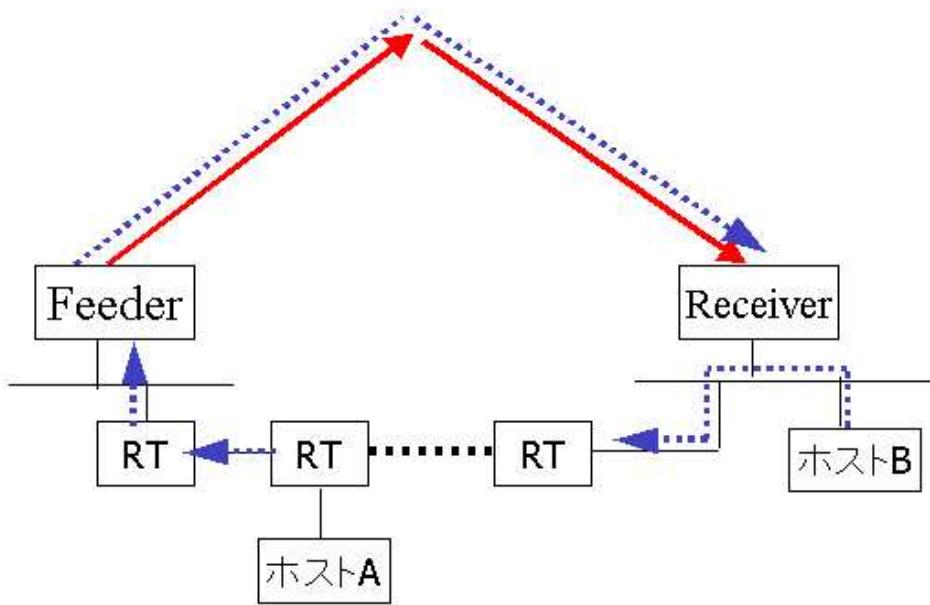


図 6.2: コスト制御のトポロジ図

すべてのルータは同一 AS に属する。また、Feeder から Receiver までの BDL には複数のルータが存在する。ネットワークの規模が大きいので、動的経路制御プロトコルの使用を前提とする。

## 運用方法

- UDLR によりカプセル化されるトラフィックを抑制するためには、図 6.2 のように、Receiver のデフォルト経路は BDL インタフェイスに向いている必要がある。

- ホスト A からのトラフィックが UDL を経由してホスト B で受信されるためには、Receiver の UDL インタフェースのコストやメトリックを、UDL 以外を経由してホスト B に到達するために経由するルータの経路のコストやメトリックの総量より小さく設定する。

### 6.2.3 UDL マルチホーム型

#### ネットワーク構成

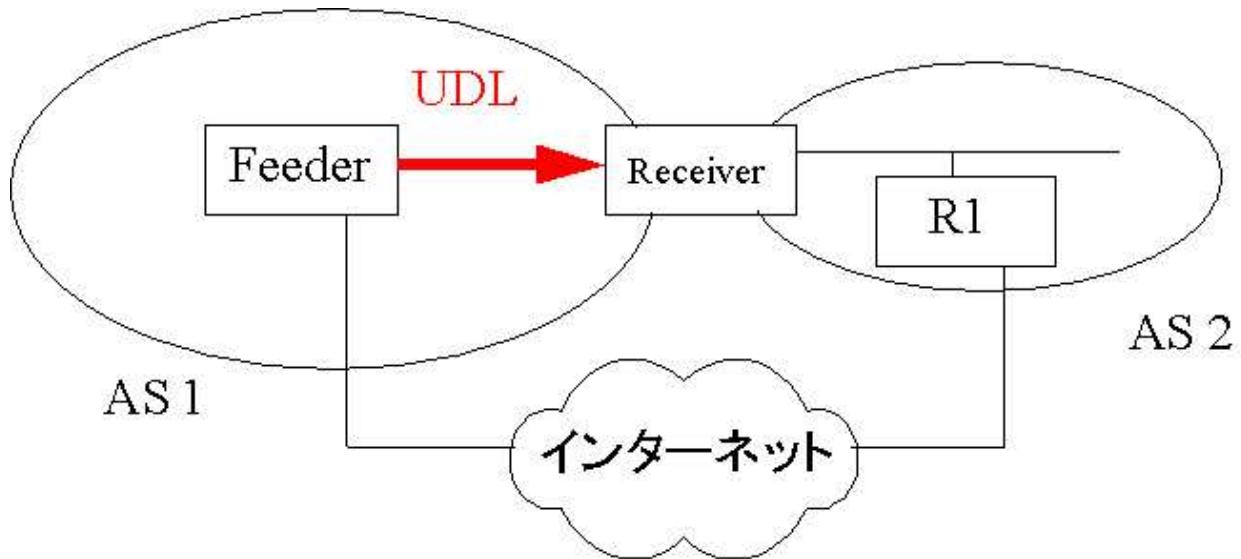


図 6.3: UDL マルチホームのトポロジ図

UDL サイトは BDL に別 AS への回線を使用している。UDL サイトは、UDL ネットワークと従来から利用している ISP とふたつの上流ネットワークを持つ。BDL の回線を保持する ISP では、IngressFilter を行っている可能性がある。

#### 運用方法

##### 1. Ingress Filter が行われている場合

- フィルタされるのを避けるため、現地の ISP のアドレスに送信元 IP アドレスを変換する必要がある。UDL サイトのホストから送信されるトラフィックは全てトンネルの経路を辿り、Feeder を経由し冗長な経路をたどり、目的ホストまで配送されなければならない。UDL サイトからのトラフィックは、戻りのトラフィックを UDL 経由で受信するため、送信元 IP アドレスに UDL サイトの IP アドレスを用いる必要がある。

##### 2. Ingress Filter が行われていない場合

- UDL サイト内のホストは UDL サイトか BDL で接続する AS の ISP のアドレスのどちらかを選択し、戻りの経路 (UDL または BDL) を制御できる。

- 現在、商用 ISP では Ingress Filter を行うことが一般的である。そのため、UDL サイトは、現地の ISP に対して、事前に UDL サイトのアドレスを Ingress Filter しないように要請する必要がある。

#### 6.2.4 UDL を用いた BGP 接続 1

## ネットワーク構成

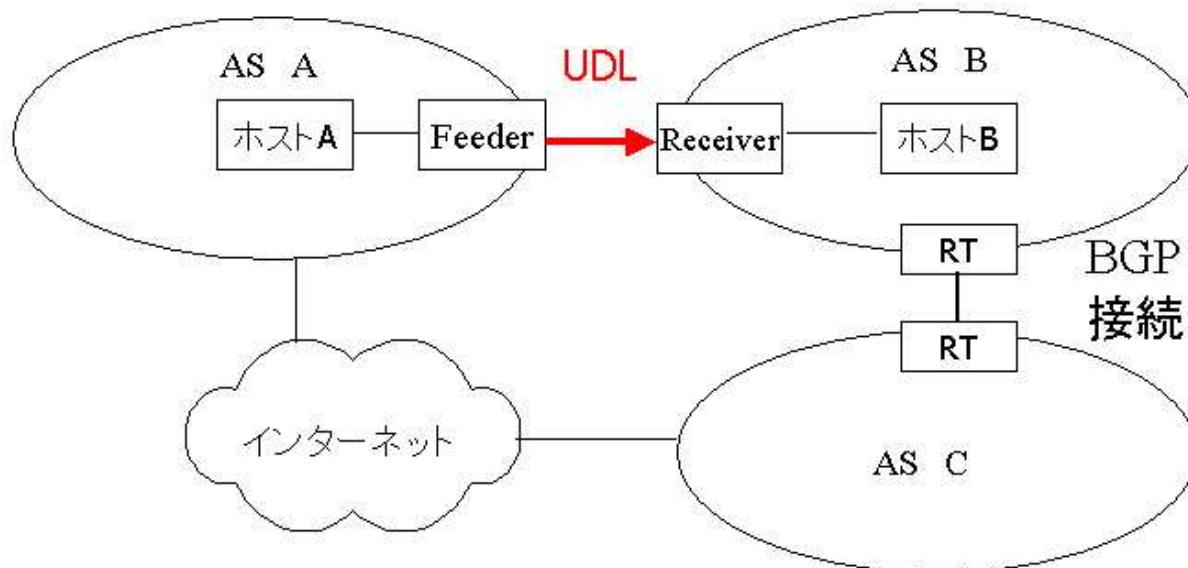


図 6.4: UDL を用いた BGP 接続 1 のトポロジ図

Feeder と Receiver は UDL を用いて BGP [18] 接続を行っている。AS B 内のルータは AS A とは異なる AS とも BGP 接続を行っている。Receiver の BDL は他の AS を経由して、Feeder に到達する。このようにネットワークを構築した場合、Receiver が属する AS へのトラフィックが UDL を経由するための BGP ポリシが必要である。

## 運用方法

- AS A の Feeder、AS B の Receiver で BGP 接続するためには、UDLR による接続性を確立するため Receiver から Feeder へ BDL による到達性が必要である。この到達性がなくなると、UDL を用いた BGP 接続は切断される。
  - AS B から AS A へのトラフィックを、UDLR によるトンネリングなしで配達するには以下の条件が必要である。
    1. AS A では AS B へ対して Feeder から経路を広告しない。
    2. AS B では Receiver で AS A から経路をもらわないように経路をフィルタする。

- Feeder から AS A の経路が広告され、AS B で選択されると、AS B から AS A へのトラフィックは全てトンネリングされ Feeder を経由する冗長な経路を通る。

### 6.2.5 UDL を用いた BGP 接続 2

#### ネットワーク構成

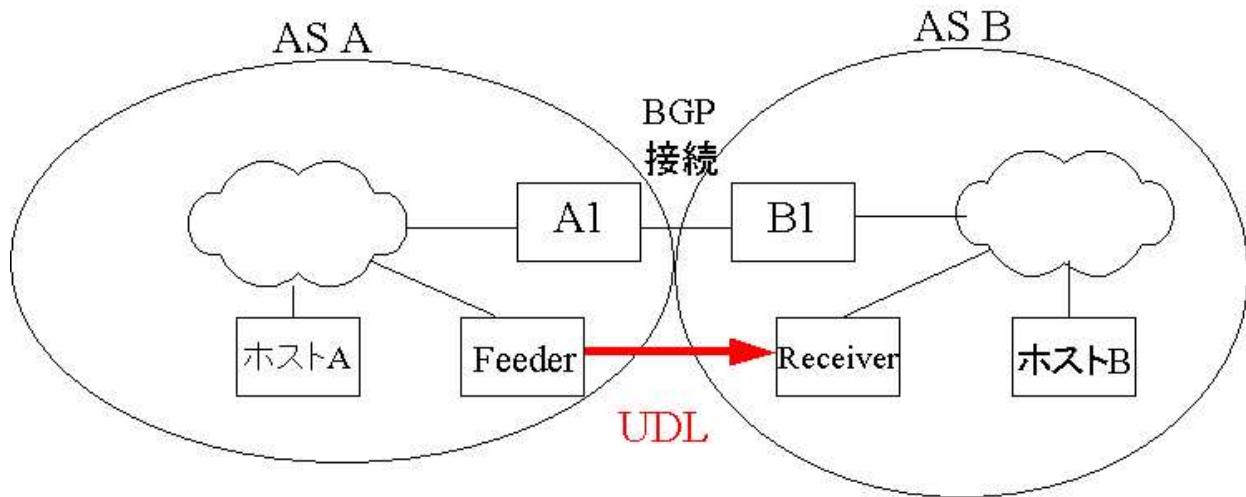


図 6.5: UDL を用いた BGP 接続 2 のトポロジ図

AS A と AS B はルータ A1-B1 間、Feeder-Receiver 間の 2 つのリンクで BGP 接続を行っている。このようなトポロジの目的として、両 AS 間のトラフィックを 2 つの回線に分散させることが考えられる。

#### 運用方法

- AS A から AS B へ UDL を用いてトラフィックを配達し、AS B から AS A へ流れるトラフィックはトンネリングせずに配達される設定を述べる。MED(Multi-Exit Discriminator)を用いて BGP の設定を行う場合、以下の設定が必要である。MED では、隣接する AS と複数の回線で BGP 接続している場合、MED で指定した値が小さいほうの回線からトラフィックを受信する。
  - AS B では、AS A へ広告する経路の MED の値を、ルータ B1 から広告する値より Receiver から広告する値を下げる。
  - AS B から AS A へ流れるトラフィックをトンネリングせずに配達するために、以下の設定が必要である。
    - AS A では AS B へ対して、Feeder から経路を広告しない。
    - AS B では Receiver において AS A から経路を受信しないように経路をフィルタする。

- Local Preference を用いる場合、以下の設定が必要である。Local Preference により、AS から出力していく経路の優先度を決定できる。一般に、Local Preference の値は大きい経路が優先される。
  - AS B では、ルータ B1 から広告する Local Preference の値を、Receiver から広告する値より大きくする。
  - AS A では AS B に対し Feeder から経路を広告しない。
  - AS B では AS A から経路をもらわないように Receiver で経路をフィルタする。
- Feeder から AS A の経路が広告され、AS B で選択されると、AS B から AS A へのトラフィックが Feeder を経由し冗長な経路を通る。

### 6.2.6 まとめ

ユニキャストのネットワーク構成法を表 6.1 に示す。ネットワークを運用していくうえで、UDLR 以外に必要になる使用技術を列挙する。また、制約条件によってトンネルに ARP, 経路制御プロトコルにより用いられるメッセージなど以外のトラフィックが流れる場合と、そうでない場合を区別する。

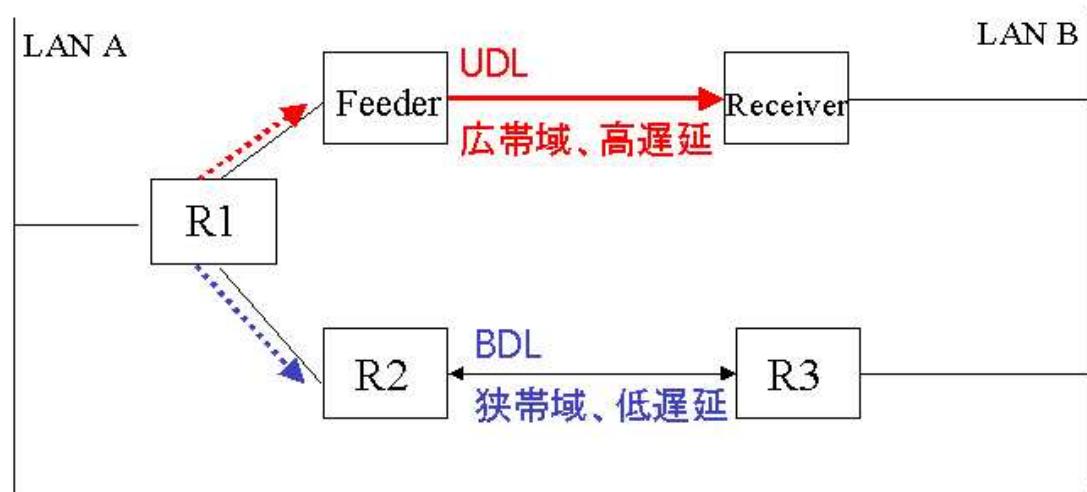


図 6.6: UDL と BDL でトラフィックの振り分け

また、衛星回線である UDL の通信性能の特徴、BDL の通信性能の特徴を考慮した場合、上記の図 6.6 のように LAN A から LAN B へのトラフィックを、ルータ R1 でトラフィックの種類によって振り分けるのが有効な場合がある。図 6.1 に、本章で提案したネットワーク構成なかで、トラフィックの振り分けが有効なネットワーク構成を示す。

表 6.1: 各トポロジの特徴と使用技術

ネットワーク構成	使用技術 (UDLR 以外)	トンネルにトラフィックが経由	トラフィックの振り分けが容易
UDL、BDL 隣接型		×	○
コスト制御型	経路制御プロトコルの適切なコスト設定	×	○
UDL マルチホーム型	ソースアドレス変換、ソースアドレスの選択	○	○
UDL を用いた BGP 接続 1	BGP	×	×
UDL を用いた BGP 接続 2	BGP	×	×

## 6.3 マルチキャスト

### 6.3.1 マルチキャスト経路制御プロトコルを利用する際の問題点

マルチキャストでは、RPF(Reverse Path Forwarding) を用いてルータが受信インターフェイスを決定し経路を決定する。RPF の概要を以下に述べる。

1. マルチキャストパケットの受信: 送信元 IP アドレス (Source S) と受信インターフェイス (Interface) を記憶し保存する。
2. Interface I が Source S へ転送表をチェックする。
  - (a) エントリーがあった場合:Interface I 以外の Interface にパケットを転送
  - (b) エントリーがなかった場合:受信パケットを廃棄

ここで用いる転送表はプロトコルにより異なり、例えば DVMRP [19] などのように独自に形成する場合とユニキャストの経路表をもちいる場合がある。

UDL サイトでは、トンネルに流れるトラフィックを軽減させるため、通常はデフォルトの経路を BDL インターフェイスに向けるべきである。しかし、この設定では UDL サイトのルータは RPF アルゴリズムによって Source に対する受信インターフェイスに BDL を選択する。UDL サイトでは、UDL を用いてマルチキャストを受信するために特殊な経路制御が必要である。

以下では、種々のマルチキャスト経路制御プロトコルを用いてネットワークを構成する際の運用方針を述べる。方針として、Receiver は UDLR によるトンネルの影響をさけるため、ユニキャストは BDL より送信し（経路表のデフォルトが BDL を向いている。）、ユニキャスト、マルチキャストは UDL により受信する。Receiver のデフォルト経路表が UDL に向いている場合、Receiver は特別な設定を必要とせず、マルチキャストパケットを受信できる。しかし、この場合、Receiver から送信されるトラフィックはすべて UDLR によりカプセル化されることになり、最適なネットワーク構成とはいえない。

### 6.3.2 DVMRP の利用

#### ネットワーク構成

単一 AS 内において、DVMRP を用いた場合の経路制御を述べる。ユニキャスト、マルチキャストともに UDL を用いてトラフィックを受信するために必要な設定を述べる。

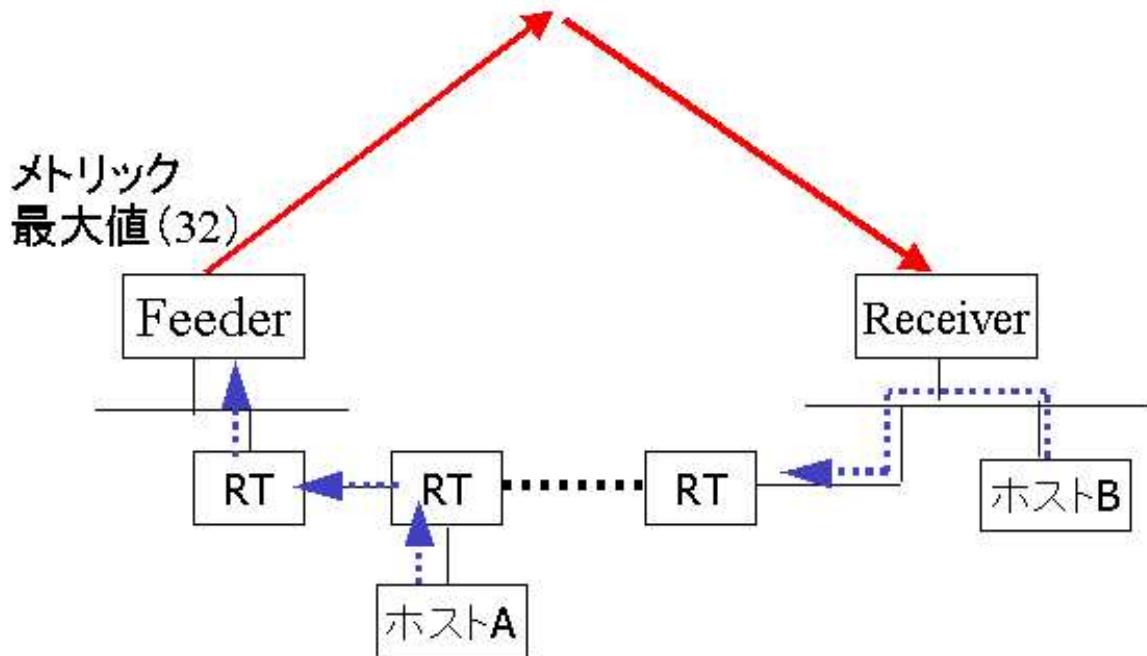


図 6.7: DVMRP を用いたネットワークのトポロジの例

#### 運用方法

- DVMRP は独自にマルチキャストを送信する転送表を作成する。ユニキャスト経路のコスト制御の設定とは別に、マルチキャスト経路のコスト制御の設定が必要になる。
- Receiver の BDL インターフェイスのメトリックと R2 から Receiver までの中間ルータのメトリックの総和が R2 から UDL を経由して Receiver に到達するまでのルータのメトリックの総数より大きい場合、UDL を経由して Host B にマルチキャストが配信される。
- Feeder の UDL インターフェイスでは UDL を経由した経路がマルチキャストの配信に使用されないよう、メトリック (DVMRP では最大値は 32) を高く設定する。

### 6.3.3 PIM-DM の利用

PIM-DM [20] では、マルチキャストの配信経路は SPT(最短経路木) の形態を取る。マルチキャストが送信されると、フラッディングとプルーニングのメカニズムを用いて、送信者から受信者への SPT が構築される。PIM-DM では、受信者から送信者への最短経路はユニキャストの経路表が参照される。

Receiver の経路が BDL に向いている場合、Receiver からマルチキャスト送信者への最短経路は BDL を通り、UDL を経由しなくなる。PIM-DM では、ユニキャストの経路表に生成された最短経路をもとに、配送経路を決定する。また、PIM-DM のプロトコルでは、配送経路を変更する機構はない。よって、Receiver の経路が BDL に向いている場合、UDL を経由してマルチキャストパケットを受信できない。

#### 6.3.4 PIM-SM の利用

##### ネットワーク構成

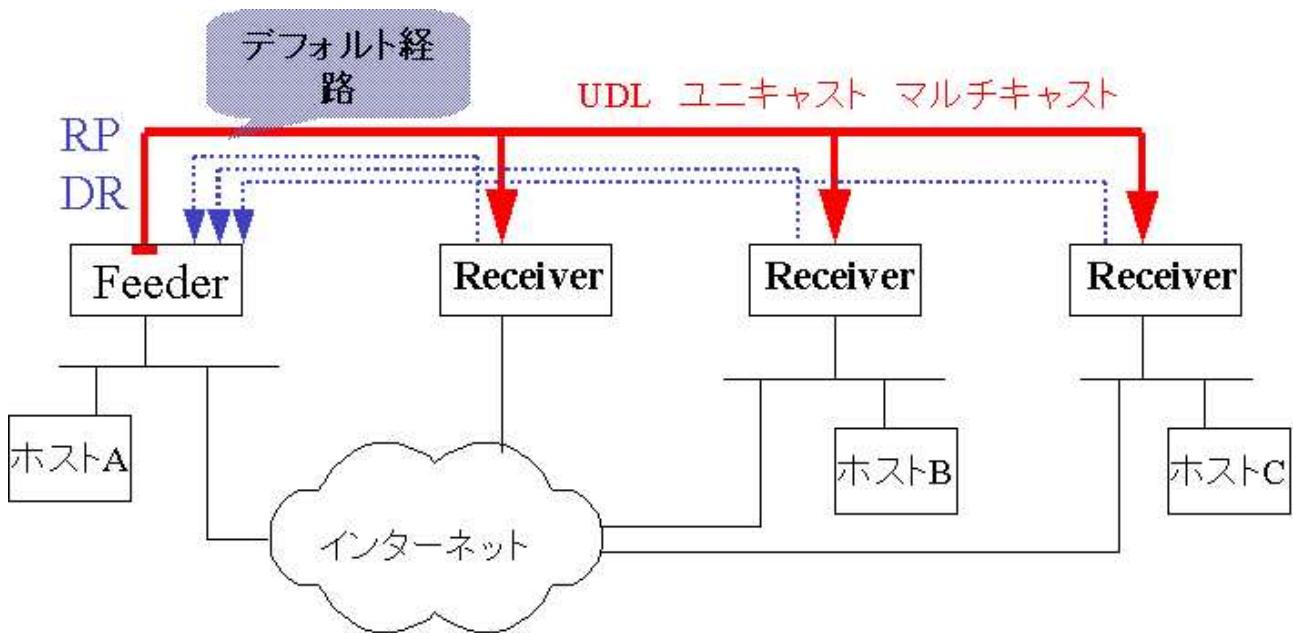


図 6.8: PIM-SM を用いたネットワークのトポロジの例

単一 AS 内で PIM-SM [21] を用いた場合のネットワーク構成を述べる。ユニキャスト、マルチキャストとともに UDL を用いて、トラフィックを受信するネットワークを構成を述べる。

##### 運用方法

- PIM-SM では、配送木の上流のルータはユニキャストの経路表を参照して決定される。UDLR を使用したネットワークでは、トンネルのオーバヘッドを避けるため、4.1.2 節で述べたように Receiver の経路は BDL を向きに設定する。そのため、SPT(Shortest Path Tree)において配送木の上流のルータは Feeder ではなく、BDL 上の Next Hop のルータである。そのため、UDL サイトでは UDL を経由してマルチキャストを受信できない。
- マルチキャストアドレスに SSM(Source Specific Multicast) アドレス (225.10.10.0/24) を利用できない。このアドレスでは、マルチキャストの配送木として、SPT を形成するからである。

- 図 6.8において、ユニキャストの経路を変えることなく、ホスト A が送信するマルチキャストパケットを UDL を経由してホスト B、C が受信するためには以下の設定が必要である。

1. 配送木は、RPT(Rendezvous Point Tree) の形態をたえず取るように設定する。
2. Feeder の UDL インターフェイスの IP アドレスを RP に設定し、他のマルチキャストルータに広告する。
3. 各 Receiver ルータは、Feeder の UDL インターフェイスの IP アドレスへの経路は UDL を利用するように手動で設定する。これにより、RPF による配送経路の計算時に上流のルータとして Feeder が選択され、各 Receiver ルータは UDL を通してユニキャスト、マルチキャストを受信する。

- PIM-SM では同一セグメント上のルータの中で DR(Designed Router) を決定する。DR の役割はホストが送信したマルチキャストパケットを PIM Register メッセージという形で RP まで送信することである。Receiver がマルチキャストパケットを送信する場合、UDLR により Receiver からのマルチキャストの送信は Feeder に代行される。DR が Feeder でない場合、他の Receiver がもう一度 RP である Feeder まで送信し、マルチキャストが冗長な経路を通る。これを避けるため、Feeder の UDL インターフェイスを DR に設定する必要がある。

### 6.3.5 ドメイン間マルチキャスト

#### ネットワーク構成

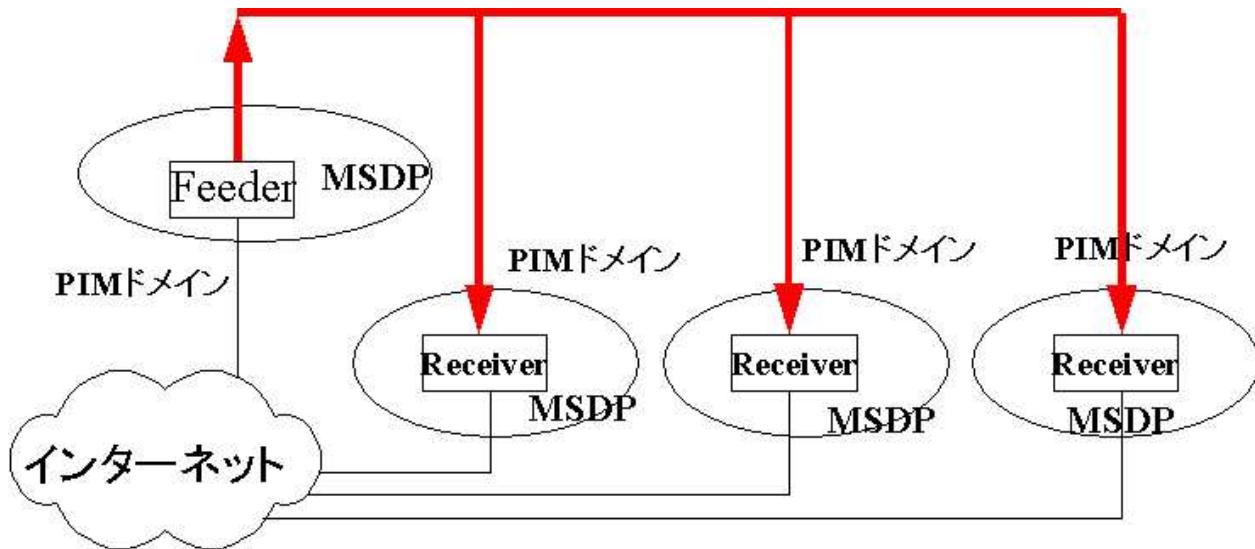


図 6.9: ドメイン間マルチキャストのトポロジの例

UDL を利用して、図 6.9 のように複数の AS のネットワークが接続している。各 AS 内では PIM-SM が動作しており、AS 単位で单一の PIM ドメインを形成している。また、MSDP [23]

を用いて各 PIM ドメインはマルチキャストグループとその送信元の情報を通知している。各 PIM ドメインのマルチキャストグループの参加者が、UDL を用いてマルチキャストを受信する設定を述べる。

### 運用方式

- UDL サイト内では Receiver が RP になる必要がある。もし Receiver が RP でない場合、UDL サイトのルータの RPF 計算では上流として Receiver が選択されず、UDL を用いてマルチキャストが配達されない。
- 各 PIM ドメイン内では配達木は RPT の形態をとる必要がある。その理由は、UDL サイトの PIM ドメイン内の配達木の形態が SPT の場合、ユニキャスト経路表を用いて RPF 計算を行われるため、上流ルータに Receiver が選ばれず UDL を経由してマルチキャストを受信できないからである。
- Receiver、Feeder は、MBGP [24] ピアをはる必要がある。MSDP では、ピア RPF を実行し、どのピアが送信元の RP への next hop か判別する。ユニキャスト経路により RPF を行うと、上流として Feeder が選択されない。しかし、MBGP を用いると、ピア RPF にユニキャスト経路表とは別の転送表を用いるため、上流として Feeder を経由する経路が選択される。

#### 6.3.6 まとめ

マルチキャストネットワークを構築するためには、Receiver が RPF により配達経路の上流を選択する際に、Feeder の UDL インターフェイスを選択するようにしなければならない。そのためには、メトリックの操作、RP の決定、MSDP、MBGP などの設定が必要となる。

# 第7章 UDLサイトの性能測定

本章では、BDL の帯域の制限による、UDL からの受信帯域の限界をモデル化した指標を算出した。現状の UDL サイトの利用分析より、一番利用が多い HTTP トラフィックを対象とした。

## 7.1 既存の研究

### 7.1.1 TCP のスループット

一般に、TCP を用いた場合、スループットは利用回線帯域 ( $BW[bps]$ ) が十分にある場合 ( $BW >> W_{max} \cdot D_{rtt}$ )、スループットの上界 ( $G[bps]$ ) は、TCP のウィンドウサイズを  $W_{max}[byte]$  とし、ネットワーク上の伝送遅延 (RTT) を  $D_{rtt}[s]$  とすると、(7.1) 式より求めることができる。

$$G = \frac{W_{max} \times 8}{D_{rtt}} [bps] \quad (7.1)$$

### 7.1.2 既存の研究と本研究の関係

既存の衛星インターネットなどの非対称なネットワーク上におけるスループットを算出した式は、ひとつのセッションのスループットを意味し、その時のネットワークの状況を必ずしも考慮にいれていない。他のセッションの存在により、対外線が埋まっている場合は当然スループットの値は異なるものになる。そのため、ネットワークの設計段階では、有効な指標とは必ずしもならない。

本研究では、AI<sup>3</sup> の UDL ネットワークでの利用分析により、UDL をよく使用しているサイトでは、BDL の帯域が占有していること状況を考慮にいれる。すなわち、BDL が占有された場合の UDL の利用効率を求める。これにより、UDL ネットワークを設計する段階で、UDL で利用できる帯域を知ることができる指標とする。

また、一般にスループットをモデル化する場合、本章で紹介したように、多くのパラメーターを必要とする。本研究では、ネットワーク設計のための指標であるので、マクロな視点からパラメーターを絞り、UDL と BDL の関係をモデル化する。

## 7.2 測定方法

### 7.2.1 想定する環境

本研究で想定する環境を述べる。図 7.1 は、2 章の図 2.6 で示されたように、Brawijaya サイトの BDL 回線が占有された時のトラフィックの内訳である。同様の環境時に、Brawijaya の UDL サイトで外部 ISP と接続するルータで tcpdump より測定した。96%が HTTP リクエス

トメッセージであった。

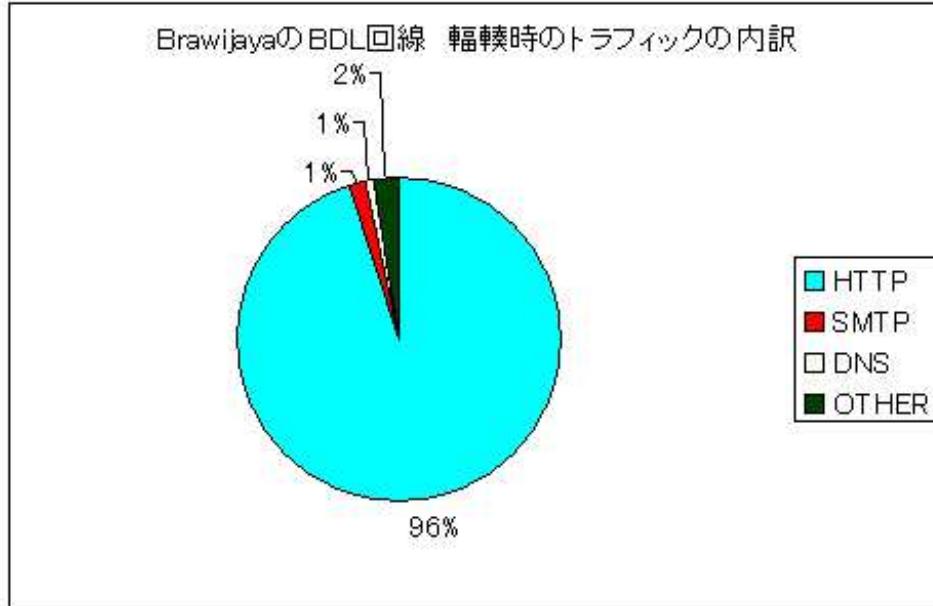


図 7.1: BDL 回線輻輳時の Brawijaya トラフィック

本研究では、BDL の回線が輻輳してしまい、通信性能を発揮しない状況での UDL と BDL の関係についてシミュレーションを行う。具体的なアプリケーションとして、AI<sup>3</sup> ネットワークでも最も使用されている HTTP を対象とする。インターネットでは様々なアプリケーションの利用が想像できる。しかし、インターネットを初めて使用するサイト、インターネット技術の未成熟なサイトでは、AI<sup>3</sup> パートナーのように、今後も HTTP プロトコルを多く利用し始めると考える。そこで、本研究では、HTTP プロトコルを対象とした。

### 7.2.2 パラメータ

ある BDL の帯域における UDL の使用帯域の上界値を求める。UDL サイトが HTTP request を送信したデータサイズが大きいと当然、UDL の使用帯域も大きくなる。本研究では、既存の研究成果で HTTP トラフィックを分析したモデルした数値を利用する。実際のインターネット利用をエミュレーションしたネットワーク環境で測定を行う。

また、パラメータとして、遅延 ( $delay(ms)$ ) と BDL の回線の帯域 ( $BDL(kbps)$ ) を使用した。ここでいう遅延 ( $delay(ms)$ ) はホストからサーバへの RTT(Round Trip Time) から、UDL の遅延である 250ms を引いたものである。UDL 上での 250ms という遅延は一定であるので、パラメータから引くことにした。

### 7.2.3 トラフィックのモデル化

エミュレーション環境で発生するトラフィックとして、HTTP を利用する。UDL サイトの使用帯域は取得する HTTP データに依存して大きくなる。トラフィックのデータを無作為に決定したのでは、有効なモデルを立てることはできない。本研究では、既存の HTTP トラフィック

のデータ量をモデル化した研究のデータを参考し、ファイルサイズ、セッションあたりのファイル数を実際のインターネットでの利用に近いものにする。

### セッションの発生率

ブラウザのクリックによって発生するHTTPプロトコルの一連の動作をセッションと定義する。過去のトラフィックの分析では、セッションの発生率はポアソン過程に従うとされているが、本研究では、図7.1のように、HTTPリクエストがバースト的に発生した状況を想定した。本研究では、BDLの帯域が占有された状況でのUDLの使用帯域の限界を算出することが目的であり、確率分布でのリクエストメッセージの発生ではBDLの帯域が必ずしも占有されない。よって、BDLの帯域が占有された状況を想定し、リクエストの発生は前のリクエストメッセージのトランザクションが終了してからすぐに送信し、BDLが輻輳する状況を作り出す。

リクエストメッセージにより、ドキュメントを受け取るとコネクションはその時点でいったん切断され、新たにリクエストメッセージを発生する必要がある、HTTP1.0[26]を利用した。図7.2にHTTP1.0プロトコルの流れを示す。

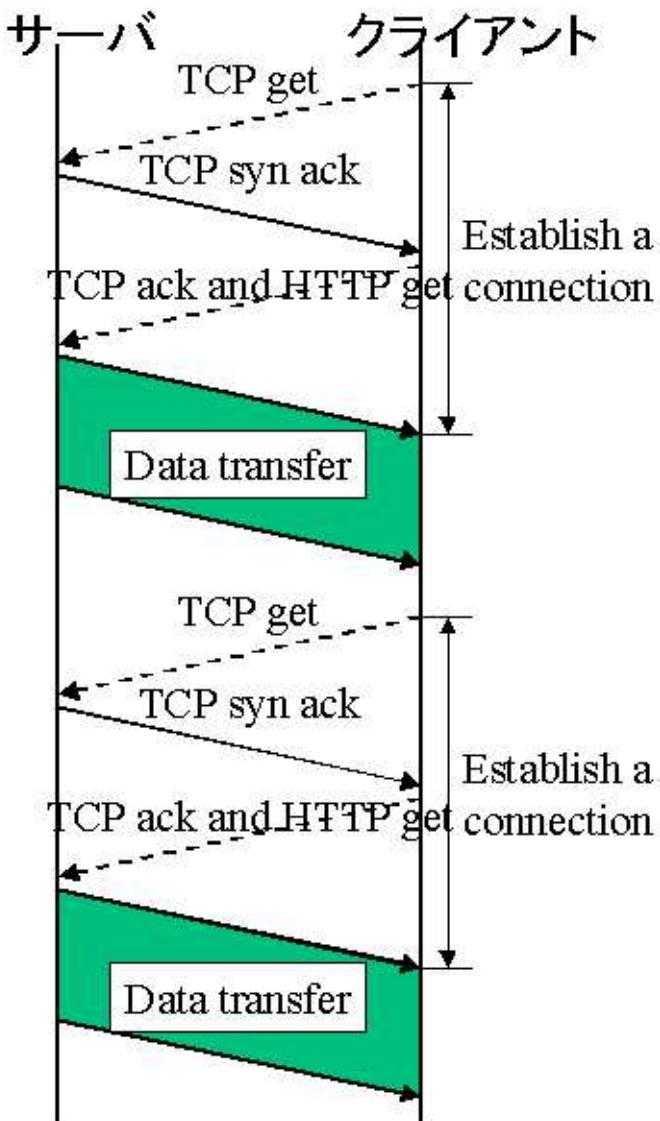


図 7.2: サーバ、クライアント間の HTTP プロトコルの流れ

### ファイルサイズ

Web を閲覧することによってサーバがクライアントへ送信するファイルには、アイコンや JAVASCRIPT などデータ量が数百 byte 程度と比較的小さいファイルを数多く含む。一方で、データサイズが大きい画像ファイルや、WEB サーバ上にある数 Mbyte クラスのデータファイルを HTTP を使ってダウンロードすることもある。論文 [27] よると、測定したデータによるとファイルサイズの平均は  $1.11 \times 10^4$  byte、分散は  $3.40 \times 10^{10}$  byte<sup>2</sup> であった。ファイルサイズの分布は幅広いが、10kbyte 以下の比較的データ量の小さいファイル数は全体の 90% を占めていた。本研究では論文 [27] を参考にして、HTTP トラフィックのデータ量は 10kbyte と均一にする。

### セッションあたりのファイル数

論文 [27], [28]によると、セッションあたりのファイル数は20個まで、全体の分布の85%を占めていることが分かった。本研究では、1つのWWWページに含まれるデータ総数を1から20個まで変化させることにした。

#### 7.2.4 測定ネットワーク環境

以下のような構成で測定を行った。

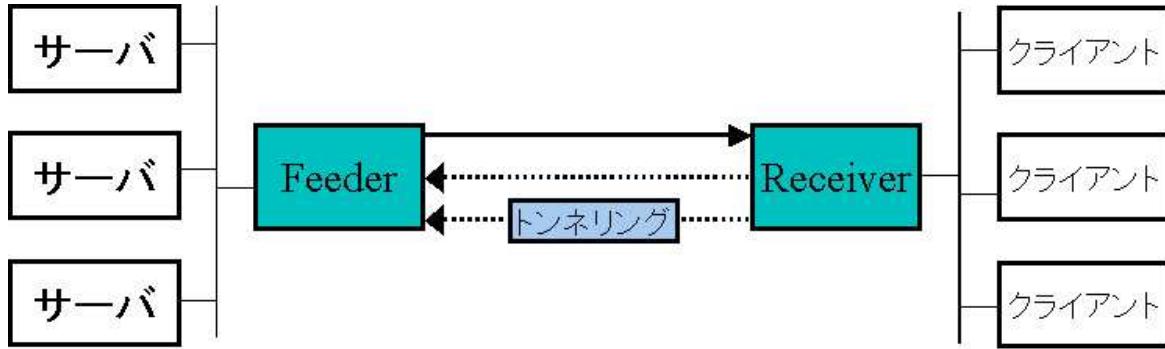


図 7.3: 測定ネットワーク環境

上記ネットワーク構成上で、実際の遅延、帯域の設定はdummynet [31]を用いて行った。遅延はUDLリンク間を250ms、BDLリンク間は変動させて、測定を行った。

トンネルの実装としては、vtun [32]を用いた。vtunによりL2トンネルを形成し、Feederからのトラフィック、Receiverからのトラフィックはそれぞれ非対称なリンクを経由するようし、UDLRを用いたネットワークと同様の構成にした。また、実際、ホストのリクエストメッセージの送信処理、サーバのリクエストメッセージの受信処理・データ送信処理自体がボトルネックにならないように複数台に冗長して行った。Webサーバとして、httpd-2.0.48 [33]を用いた。

#### 7.2.5 測定

測定では、あるBDLの帯域で、HTTPリクエストを増加させても、UDLの使用帯域が増加しない場合のUDLの使用帯域を計測した。また、実際の測定の際には、BDLを経由するトラフィックがカプセル化される場合と、カプセル化されない場合に分けて、ReceiverからFeederへの遅延（ホストからサーバまでのRTTから250ms引いた値）とBDLの帯域をパラメータとして、UDLの利用帯域を算出する。

## 7.3 測定結果

まず、測定結果より、トンネルを経由する場合、経由しない場合、UDLの使用帯域を表す三次元の散布図を作成した。

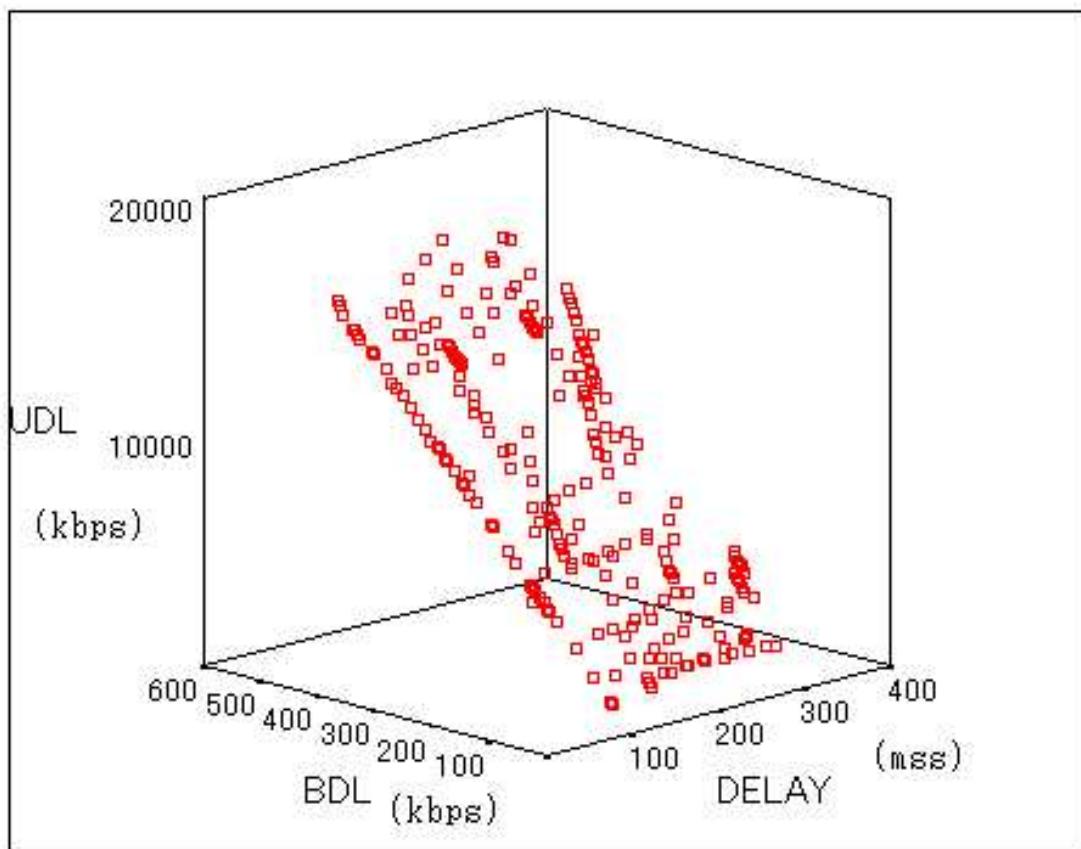


図 7.4: トンネルを経由しない場合の UDL の使用帯域

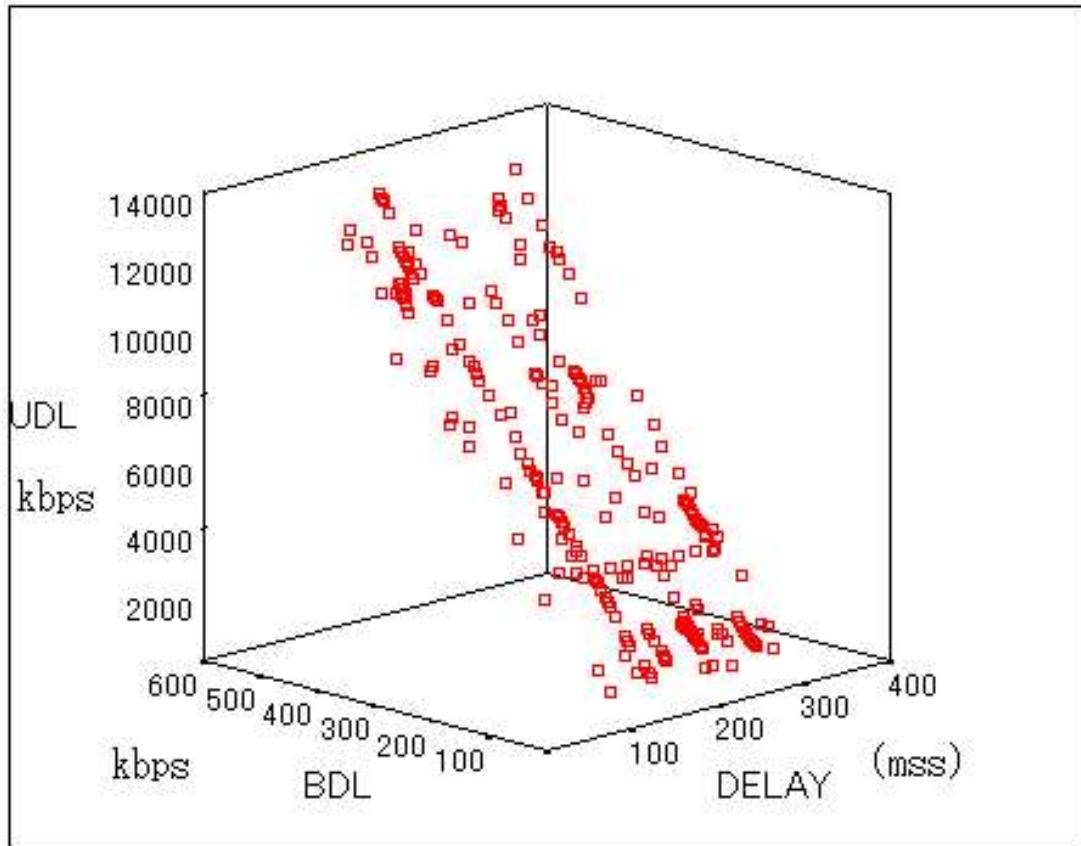


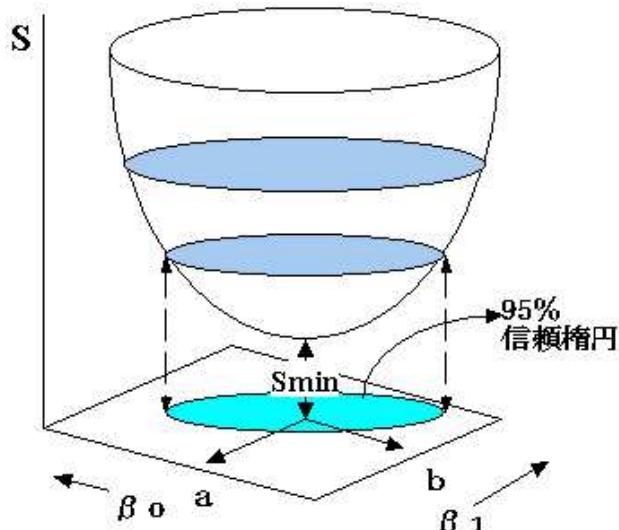
図 7.5: トンネルを経由する場合の UDL の使用帯域

## 7.4 UDL と BDL の関係のモデル化

### 7.4.1 モデル化の方法

論文 [29], [30] などでは、シミュレーションにより得られたデータより、最小二乗法を用いて、回帰方式を算出する形で、プロキシサーバのキャッシング機能、WEBシステムのモデル化を行っている。最小二乗法のイメージを図 7.6 に示す。要因  $X$  と特性  $Y$  について、 $n$  個のデータ対が得られ、要因  $(i = 1, 2, \dots, n)$  と特性  $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$  の間に一次関係があると仮定する。

式の未知数は、 $y_i$  とその推定値との差が全体としてできるだけ  $S$  の値が小さくなるように決める。



**最小2乗法のイメージ**

図 7.6: 最小二乗法のイメージ

本研究でも、BDLとUDLの関係を表す指標を算出するために、測定により得た結果から最小二乗法より回帰方程式を算出し、モデル化を行う。実際には、様々な要因によりUDLの使用帯域は決まるが、本研究では、BDLの帯域と遅延によりモデル化を行う。これにより、UDLとBDLを併用した環境においてBDLに輻輳が生じた場合、その回線をどの程度増強すればUDLの性能を最大にできるかの指標が得られる。また、このデータからUDLの帯域中でユニキャストトラフィックには使用されない、余剰の帯域幅が分かる。これにより、マルチキャストによる放送型のアプリケーションを利用する場合に、ユニキャストの通信に影響を与えない範囲で利用できるUDL上の帯域幅が分かる。

UDLとBDLの関係を探るため、それぞれの散布図を作成した。図7.7、図7.8より、UDLの使用帯域について、BDLの値により線形増加していることがわかる。

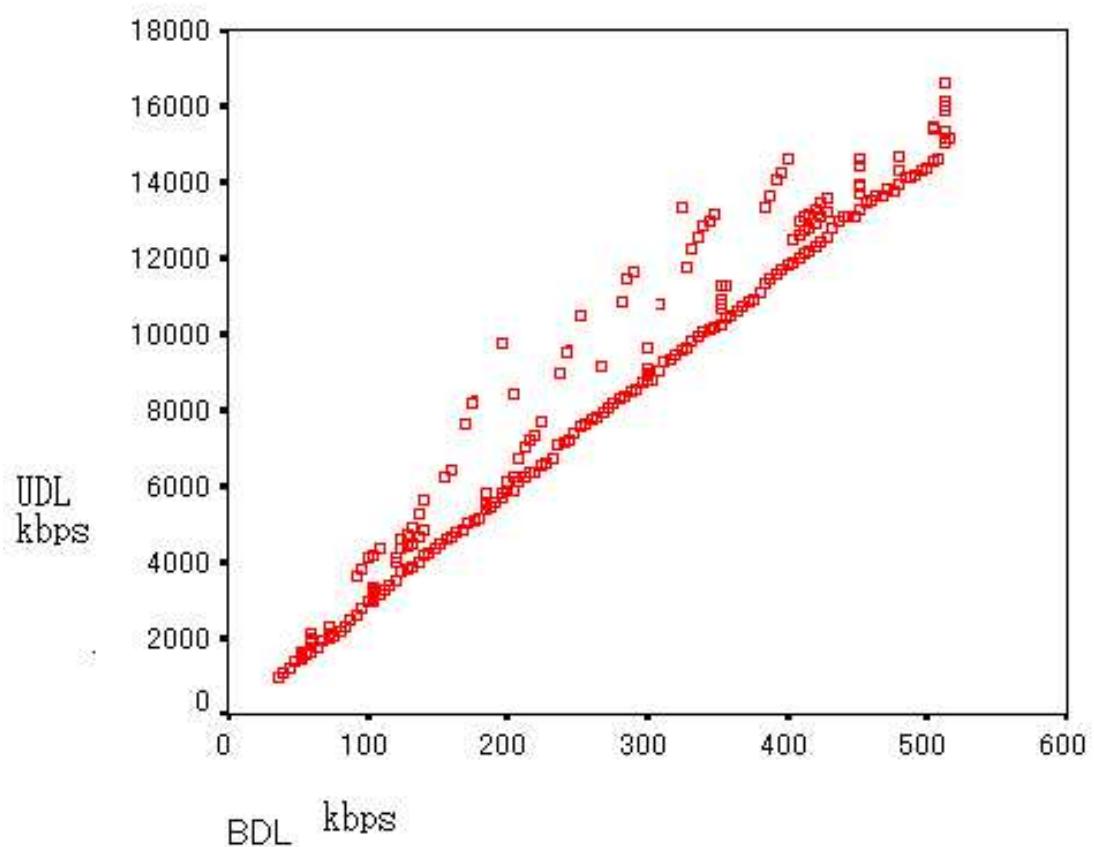


図 7.7: トンネルを経由しない場合の UDL と BDL の散布図

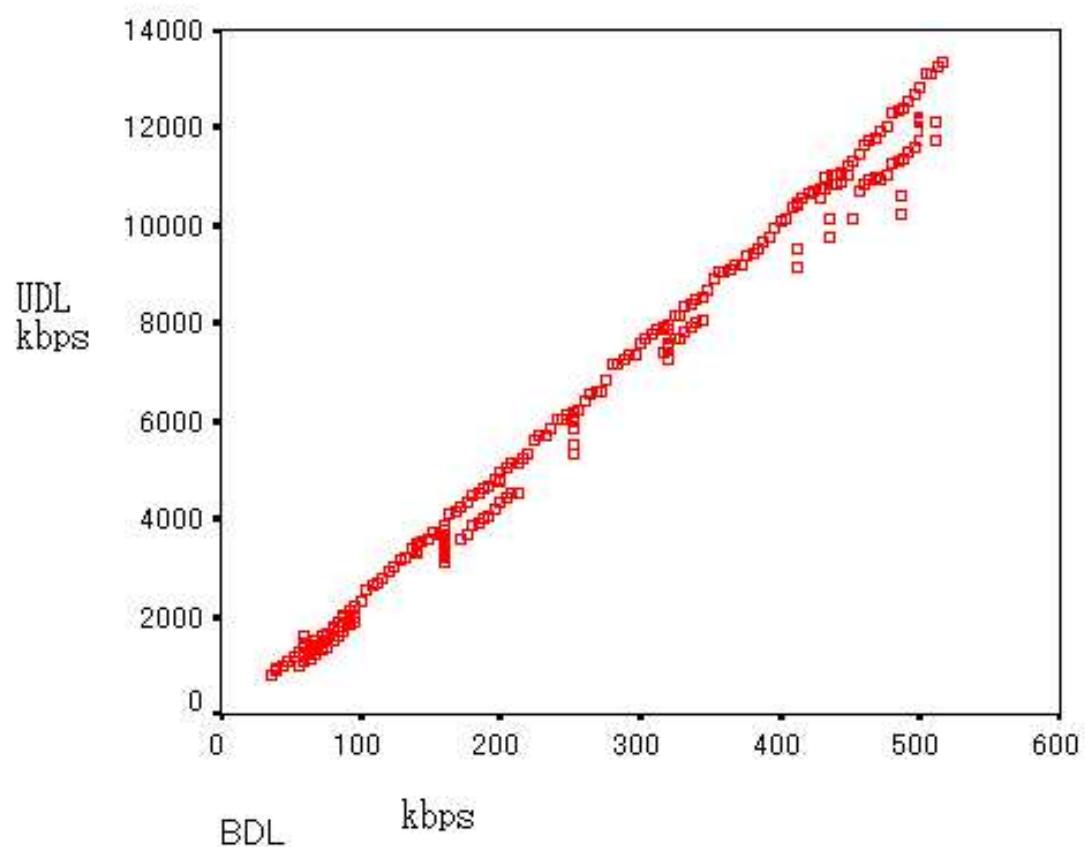


図 7.8: トンネルを経由する場合の UDL と BDL の散布図

UDL の使用帯域と遅延の値の関係を探るため、それぞれの散布図を作成した。

図 7.9、図 7.10 より、ある遅延時における UDL の使用帯域について、UDL と BDL の関係のように顕著な特徴を見出すことはできない。

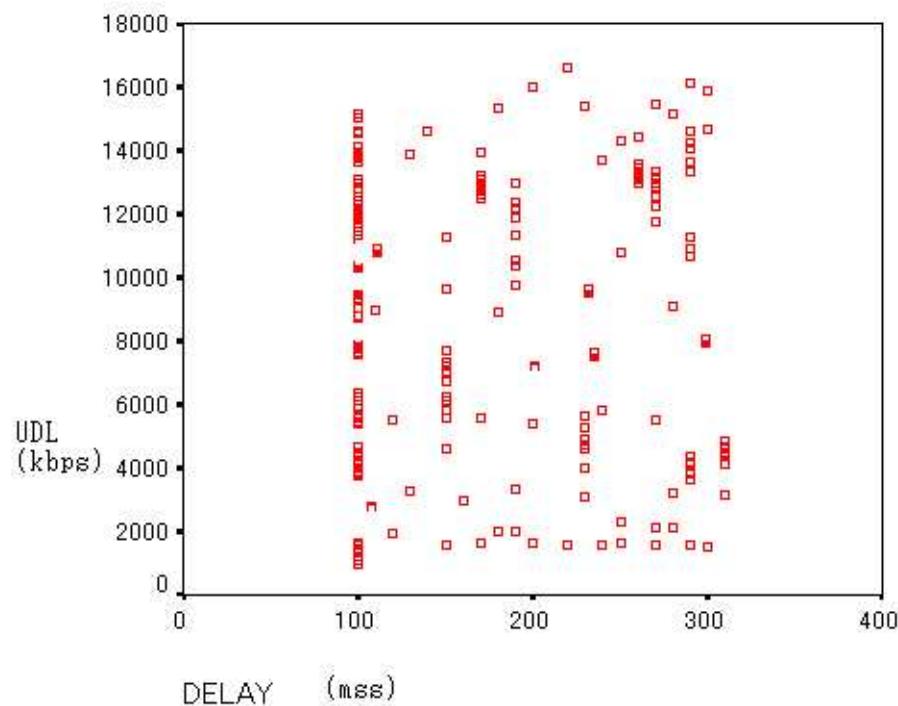


図 7.9: トンネルを経由しない場合の UDL と遅延の散布図

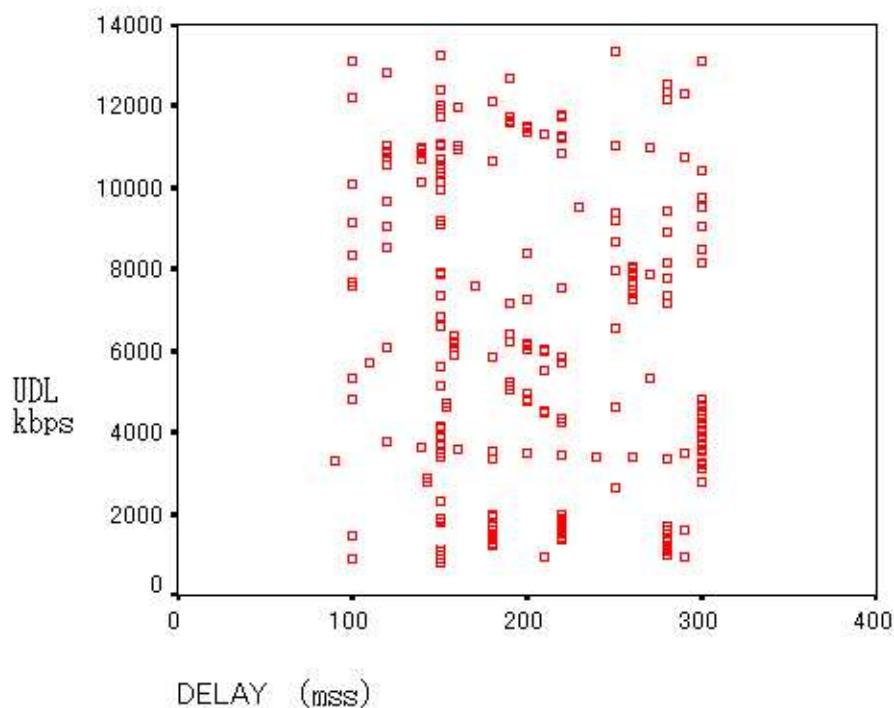


図 7.10: トンネルを経由する場合の UDL と遅延の散布図

#### 7.4.2 回帰式の算出

本節では、UDLとBDLの関係を  $UDL = BDL \times a + delay \times b + c$  という形でモデル化する。 $delay$  の値は、ホストからサーバへの RTT の値から衛星回線の遅延 250ms を引いたものである。本研究の測定より得られたデータとモデル式との誤差が最小になるように、回帰式を算出する。

以下にトンネルを経由しない場合、UDLの使用帯域を回帰式によりモデル化した。

$$UDL(kbps) = BDL(kbps) \times 30.195 + delay(ms) \times 5.676 - 772.278 \quad (7.2)$$

次に、UDLの使用帯域をトンネルを経由する場合、UDLの使用帯域を回帰式によりモデル化した。

$$UDL(kbps) = BDL(kbps) \times 24.980 + delay(ms) \times 2.051 + 255.390 \quad (7.3)$$

図7.7、図7.8ではUDLとBDLの関係より強い線形増加の関係が読み取れた。そのため、変数  $a$  の値として大きな値が出た。式(7.2)、式(7.3)を比べると、トンネルを経由しない場合のほうが BDL の帯域は UDL の使用帯域に大きな影響を与えることがわかる。

一方で、図7.9、図7.10より UDL と  $delay$  の関係について明確な関係を見出すことができなかった。しかし、式(7.2)、式(7.3)ともに変数  $b$  に正の値が算出された。回帰式によると、遅延の増加は使用帯域の増加を意味する。

これは、回帰式  $y = ax_1 + bx_2 + c$  により算出する係数、 $a, b$  は単に目的変数  $y$  と  $x_1, x_2$  の関係をそれぞれ個別に意味するものではないからである。 $a$  の値は、 $y$  と  $x_1$  に対してそれ自体  $x_2$  の影響を除いた場合の値を意味する。本研究で算出した回帰式では、 $delay$  は UDL の使用帯域に影響することを意味する。BDL の帯域が同一である場合、 $delay$  の値は UDL の使用帯域に影響を与える。ただし、その影響の度合いは、算出された係数の値より、UDL と比較すると大幅に弱いことが言える。

(7.2)、(7.3)の式を指標として得た。以下で、統計的正当性を検証することで、本研究で算出したモデル化の検証を行い、正当性を証明する。

#### 7.4.3 統計的正当性

回帰式により示したモデルが正しいものであるかの妥当性の検討は、正しい結論を導くために不可欠である。以下で示す検討を行い、本研究で示したモデルが妥当であることを証明する。

#### モデル化の有意性の検定

実測値と本研究によりモデル化した理論値（予測値）が近くなるほど、分析の精度が良いと言える。統計学では、回帰式により説明できた予測値の分散と実測値の分散の割合をもとめ、回帰式の当てはまりのよさを表現する。この割合のことを決定係数（または、寄与率）という。以下の表7.1に、トンネルを経由する場合としない場合の回帰式の決定係数を示す。一般に、決定係数の値が値が大きいほど、回帰モデルがあてはまっており、小さければあてはまりがよくないことになる。決定係数の値は 0~1 の範囲となる。

ある1回の調査により得られたデータから統計量を計算し、その値以上の統計量が得られる確率（これを有意確率またはP値という）を求める。有意確率が0.05の場合、20回に1回は決定を誤る危険性があることを意味する。

表7.1: 決定係数と有意確率

	決定係数	有意確率
トンネルを経由しない場合	0.988	0.000
トンネルを経由する場合	0.995	0.000

決定係数の値は1に近く当てはまりが非常に良い。有意確率の値は一般的な有意水準(0.05)よりも非常に小さく、提案するモデルが妥当であることを意味する。

### 誤差についての仮定の検討

測定に得られたデータは、回帰式に従う母集団よりランダムに選ばれたものであることが前提となっている。そのため、測定に得られたデータと回帰式による値の誤差（以下、残差と言う）はランダムであり（期待値が0、分散が一定）、正規性があることが要求されている。以下で検証を行う。

残差がランダムであるかどうか、あるいは等分散であるかどうか検討するために、トラフィックがトンネルを経由する場合、しない場合それぞれに対して、図7.11、図7.13、図7.12、図7.14ように、縦軸に残差、横軸にUDLの使用帯域の予測値あるいは実測値をとった散布図を描いた。

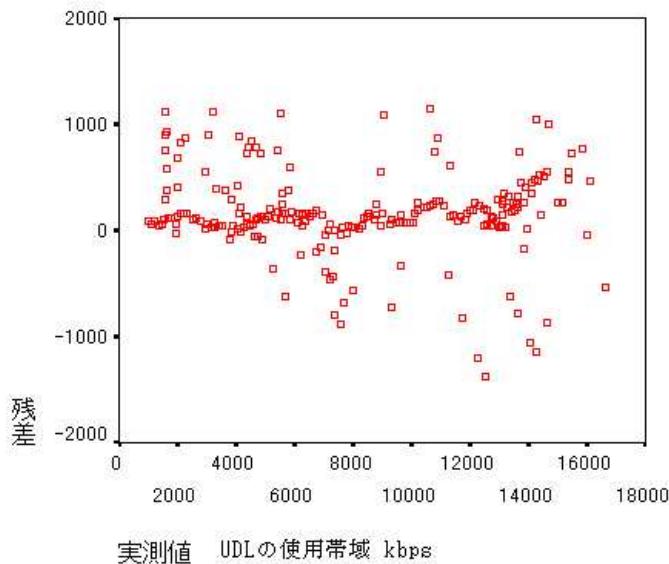


図7.11: トンネルを経由しない場合、UDLの使用帯域に関する残差と実測値の散布図

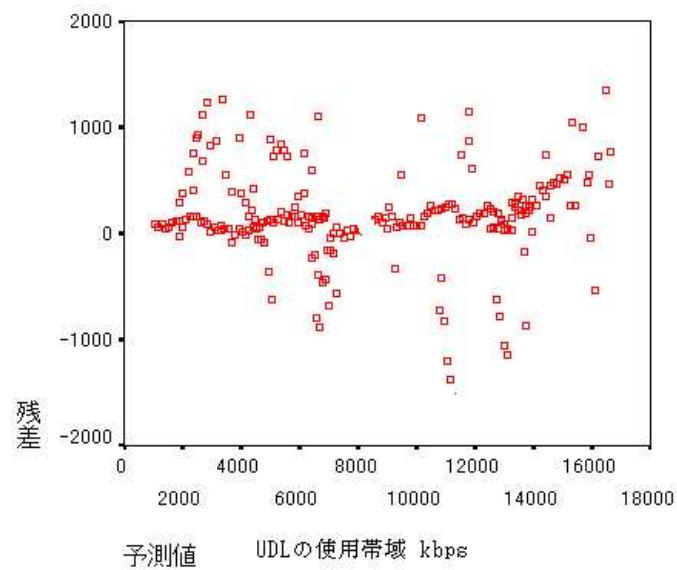


図 7.12: トンネルを経由しない場合、UDL の使用帯域に関する残差と予測値の散布図

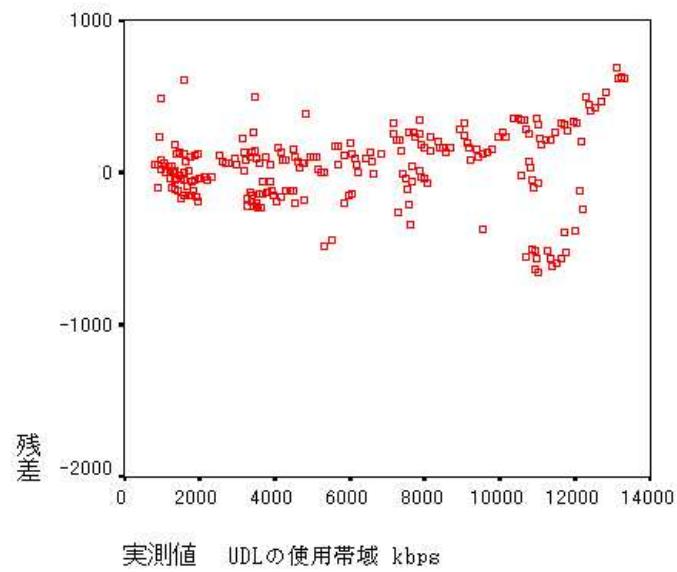


図 7.13: トンネルを経由する場合、UDL の使用帯域に関する残差と実測値の散布図

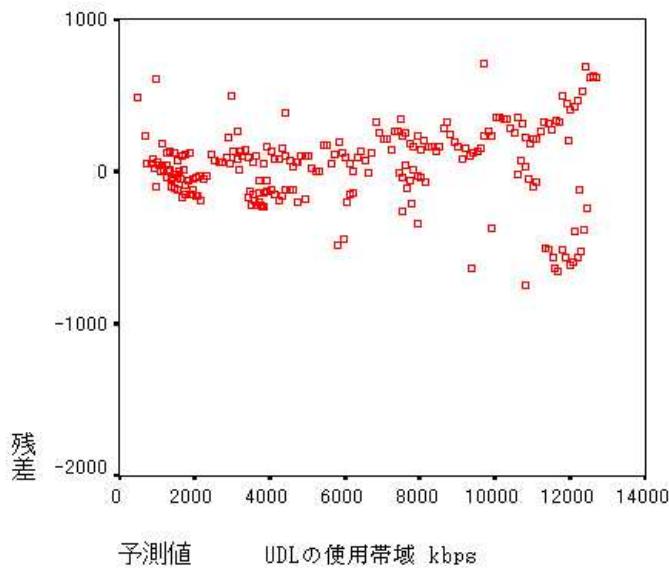


図 7.14: トンネルを経由する場合、UDL の使用帯域に関する残差と予測値の散布図

もし、散布図より縦軸と横軸に関して、曲線関係が読み取れた場合、残差がランダムであるという仮定は崩れ、モデル化の正当性を証明することはできない。しかし、図 7.11 と図 7.12、図 7.13 と図 7.14 をそれぞれ比較しても何らかの傾向を読み取ることはできない。

### 影響力の大きいサンプルの検出

算出したモデルに対して、すべての実測値のデータが平等に寄与していることが望ましいが、実測値の分布状況によっては、少数個のサンプルの寄与が大きく、それらのサンプルだけによって回帰式の結果がほとんど決まってしまうということが起きる。もし、そうである場合、得られた結果に対する普遍性が危ぶまれる。

残差が特に大きいサンプルを外れ値とい。残差が大きいかどうかの判断は、残差が残差の標準偏差の何倍であるかによって決める。残差  $e_i$  の標準偏差 ( $s(e_i)$ ) は  $e_i$  ごとに異なるから、 $i$  番目の誤差の  $t_i$  は、 $t_i = \frac{e_i}{s(e_i)}$  として、算出される。 $t_i$  の絶対値が 2.5 以上の時、はずれ値と認定することにした。それぞれの BDL に対する UDL の使用帯域のデータで、 $t_i$  を算出したが 2.5 以上となるはずれ値が存在した場合、その値を削除してモデル化をやりなおした。

## 7.5 まとめ

本章では、シミュレーションを行い、UDL と BDL の関係を回帰式で表した。回帰式より、 $delay$  と BDL の値がそれぞれ UDL の使用帯域に影響を与えるが、 $delay$  の影響は BDL の帯域に比べると、影響度が小さいことがわかった。また、作成した回帰式の妥当性を検証した。

# 第8章 結論

## 8.1 まとめ

本研究では、UDL ネットワークの設計手法を述べた。そのため、以下の 3 つの事項を行った。

1.  $AI^3$  ネットワークの利用分析を行い、 $AI^3$  ネットワークでの利用状況ならびに UDLR によるトンネルの影響を考察
2. UDL ネットワークの構成法の提案
3. シミュレーションにより、UDL と BDL の関係の数理モデル化

$AI^3$  の利用分析では、 $AI^3$  traffic Repository を構築し、現在の  $AI^3$  ネットワークでの利用を紹介した。また、分析により、UDLR の GRE によるカプセル化により、1.5-2.0 倍の帯域を多く消費してしまうことがわかった。UDL サイトから送信されるトラフィックが GRE によりカプセル化されてしまう場合、BDL の通信性能は従来より発揮されないということが認識できた。

また、インターネット上での Feeder と Receiver の関係を整理し、ユニキャスト、マルチキャストネットワークの最適な UDL ネットワーク構成を述べた。特にマルチキャストネットワークでは、Receiver が RPF により上流を選択する際に、Feeder の UDL インターフェイスを選択するようにしなければならない。そのためには、メトリックの操作、RP の決定、MSDP、MBGP などの設定が必要となるので、注意する必要がある。

UDL と BDL を併用した環境において UDL サイト内から送信されるリクエストメッセージや TCP の ack パケットにより BDL に輻輳が生じた場合、その回線をどの程度増強すれば UDL の性能を最大にできるかの指標が得られた。また、UDL はマルチキャスト通信としての利用が期待されている。本研究の成果より、UDL の帯域中でユニキャストトラフィックには使用されない、余剰の帯域幅算出することができる。これにより、UDL ネットワークでマルチキャストを利用する場合に、ユニキャストの通信に影響を与えない範囲、そしてマルチキャストトラフィックを十分に配信するために利用できる UDL 上の帯域幅が分かる。

## 8.2 今後の課題

### 8.2.1 UDL ネットワークの構築

衛星回線には、他のインターネットの通信路として用いる回線と比べて、広域同報性、地理普遍性といった特徴がある。その特徴を活かすことにより、人々のインターネット利用の利便性を上げることができる。現在では、 $AI^3$  パートナーのように、UDL サイトからの送信トラフィックは UDLR のトンネルを経由する形でネットワークを構築されている UDL サイトがほとんどである。この接続法では、トンネルによる通信性能の低下などが発生し、UDL を有効に

用いられているとは言えない。今後は、六章で、検討した BGP を用いた接続や、ドメイン間マルチキャストによる接続などを行っていく必要がある。

それにより、インターネット上で UDL が有効に使われることになる。

### 8.2.2 UDL ネットワークの性能向上手法の検討

アプリケーションのスループットをあげる技術として、キャッシング技術がある。主に、HTTP プロトコルやストリーミングなどで用いられる。UDL サイトでキャッシングを用いると、BDL 回線の帯域が占有されてしまうのを軽減することができる。今後はキャッシング技術などの導入も検討していく必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたりご指導を賜わりました慶應義塾大学環境情報学部村井純博士、同学部助教授楠本博之博士、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科山口英博士に深く感謝いたします。また、絶えず貴重なご助言とご指導を頂きました慶應義塾大学環境情報学部助教授中村修博士、同学部専任講師重近範行博士に感謝いたします。

本研究を進める上で、多くの段階で終始貴重なご助言を頂きました慶應義塾大学院政策・メディア研究科後期博士課程の藤枝 俊輔氏（しろくまさん）、Achmad Husni Thamrin 氏（フスニ）に深く感謝します。

本論文の執筆に当たりまして常に励ましとご協力を頂きました慶應義塾大学院政策・メディア研究科モービル広域ネットワークプロジェクト、徳田、村井、楠本、中村、南合同研究会の諸氏に感謝します。また、私にネットワークに触れる機会とともに、技術だけでなく、精神的にも成長する機会をいただきました Asian Internet Interconnection Initiatives Project、WIDE Project の皆様に感謝いたします。

最後に、母親亡き後も、わがままな私の面倒をひとりでみてくださった父、臼井功に感謝します。

## 関連図書

- [1] RFC3077:A Link Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links
- [2] SOI-ASIA プロジェクトホームページ <http://www.soi.wide.ad.jp/soi-asia/>
- [3] AI<sup>3</sup> プロジェクトホームページ <http://www.ai3.net>
- [4] RFC2827: Network Ingress Filtering: Defeating Denial of Service Attacks which employ IP Source Address Spoofing
- [5] ARP プロトコル RFC826:An Ethernet Address Resolution Protocol
- [6] NDP プロトコル RFC2461:Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)
- [7] 西田視磨 楠本博之 村井純,”单方向衛星回線を含むネットワークの為のアドレス変換機構を用いたネットワークアーキテクチャ”, 電子情報通信学会和文論文誌 B-II 1998年5月号「衛星通信実験論文小特集」 p.458-p.467
- [8] 竹井 淳 泉山英孝,”片方向回線を用いたインターネット接続サービスにおける資源割当方式の検討” 電子情報通信学会論文誌 VOL.J85-B No.8 August 2002
- [9] WIDE プロジェクトホームページ <http://www.wide.ad.jp>
- [10] APAN ホームページ <http://www.apan.net>
- [11] MRTG ホームページ <http://people.ee.ethz.ch/~oetiker/webtools/mrtg/>
- [12] RFC1907:Protocol Operations for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
- [13] tcpdump ホームページ <http://www.tcpdump.org>
- [14] libpcap ホームページ <http://ftp.ee.lbl.gov/>
- [15] rrdtool ホームページ <http://people.ee.ethz.ch/~oetiker/webtools/rrdtool>
- [16] gnuplot ホームページ <http://www.gnuplot.info>
- [17] squid ホームページ <http://www.squid-cache.org/>
- [18] RFC3345:Border Gateway Protocol (BGP)
- [19] RFC1075:Distance Vector Multicast Routing Protocol

- [20] Estrin, D., Farinacci, D., Jacobson, V., Liu, C., Wei, L., Sharma, P., and A. Helmy, "Protocol Independent Multicast-dense Mode (pim- dm): Protocol Specification", Work in Progress.
- [21] RFC2362:Protocol Independent Multicast-Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification
- [22] RFC3569:An Overview of Source-Specific Multicast(SSM)
- [23] RFC3618:Multicast Source Discovery Protocol (MSDP)
- [24] RFC2283:Multiprotocol Extensions for BGP-4
- [25] 天野橋太郎、石田賢治、河西宏之、舟阪淳一、"衛星通信システムを用いた非対称ネットワークに関する研究"
- [26] T.Berners-Lee,R.Fielding,H.Frystyk,"Hypertext Transfer Protocol - HTTP/1.0" RFC1945
- [27] Kleber V. Cardoso, Jose F. de Rezende "Design and Use of an aggregated HTTP Traffic Model"
- [28] 小上賢一 "東工大 LAN 測定データに基づいた Web トライフィックモデル" 東京工業大学 情報理工学研究所 数理・計算科学専攻
- [29] 藤田靖征、村田正幸、宮原秀夫 "プロキシサーバにおけるキャッシュ機能を考慮した Web システムのモデル化と性能評価"、電子情報通信学会論文誌 1999 年 B-I Vol.J82-B-I
- [30] 藤田靖征、村田正幸、宮原秀夫 "Web サーバのモデル化と性能評価"、電子情報通信学会論文誌 1999 年 B-I Vol.J84-B-I
- [31] dummynet ホームページ <http://info.iet.unipi.it/~luigi/>
- [32] vtun ホームページ <http://vtun.sourceforge.net/>
- [33] Apache HTTP Server Project,available at <http://www.apache.org>