

# 9

## 仮想データリンク技術を考慮した 実装モデルと運用実験

小巻 賢二郎\*

近年、IPに対して任意の数や特性のデータリンクを提供する仮想リンク技術がさまざま登場している。これら既存の技術は、実装モデルにおいて各技術が独自にIP層やデバイスドライバ層で設計、実装しているのが現状であり、各層への依存問題や仮想リンク技術の融合不可という問題を抱えている。

そこで本研究では、デバイスドライバ層とIP層の間に、仮想リンク技術を集約してデータリンクの抽象化を行う新たな層（Abstract DataLink, ADL層）を導入する。本システムではADL層の存在により、各層への依存問題を解決することができる。またADL層内部でモジュール構造を採用することで、仮想リンク技術の融合などさまざまな利点を得る。

本稿では、ADL層の基本設計について述べた後、ADL層を導入したシステムをWIDE合宿ネットワークにおいて実現し、その柔軟性、汎用性について検証する。

### 仮想リンク技術

#### ■既存の仮想リンク技術

近年の計算機の性能向上やデータリンク技術の革新によって、データリンクの高速化、多様化が進んでいる。さらに、計算機やデータリンクの性能向上に加えて近年のインターネットにおける一般ユーザの爆発的な増加がインターネット上のサービスに影響を与え、多様なサービスがインターネット上で提供されるようになった。これらのデータリンクの多様化、サービスの多様化が進むにしたがって、性能向上した計算機の余剰なマシンパワーを用いて、データリンクに対する柔軟性を得ようとする技術が登場してきた。これが仮想リンク技術である。本稿では、仮想リンク技術によって抽象化されたデータリンクを仮想リンクと呼び、それに対して実際のデータリンクを物理リンクと表現する。

IPは仮想リンク技術によって、物理リンクに加え抽象化された仮想リンクも扱うことが可能である。つまり、仮想リンク技術はデータリンクの抽象化を行う技術であるといえる。以下では、既存の仮想リンク技術としてMulti Link, Virtual Link, Multipath Routingについて簡単に述べる。

#### Multi Link

Multi Linkは複数の物理リンクを束ねて1本の広帯域な仮想リンクを構築する。これは、複数の物理リンクを隠蔽して抽象化し、IPに対して仮想的な広帯域リンクを提供する技術であるといえる。実際には、送信パケットを複数の物理リンクに分配することによって実現する。

具体例として、あるノード間で128Kbpsの専用線を4本束ねた場合のMulti Linkの様子を図-1に示す。

Multi Linkの実現例としてはMulti Link PPP<sup>1)</sup>がある。Multi Link PPPではPPPに利用される複数のリンクを束ねることによって、上位層に対してMulti Linkによる仮想リンクを提供する。実際には、IPに提供するPPP専用デバイスの下位で複数の物理リンクを束ねることになり、デバイスドライバ層でMulti Linkを実現する技術である。

#### Virtual Link

Virtual LinkはMulti Linkと逆の概念であり、1本の広帯域な物理リンクを複数の仮想リンクに分割する技術である。1本の広帯域リンクをIPから隠蔽して抽象化し、IPに対して複数の仮想リンクを提供する。イーサネットにおけるVirtual Linkの例を、図-2に示す。

Virtual Linkを実現するためには、物理リンクを分割した際に割り当てられる識別子を、送信パケットに付加する必要がある。これにより、パケットの属する仮想リ

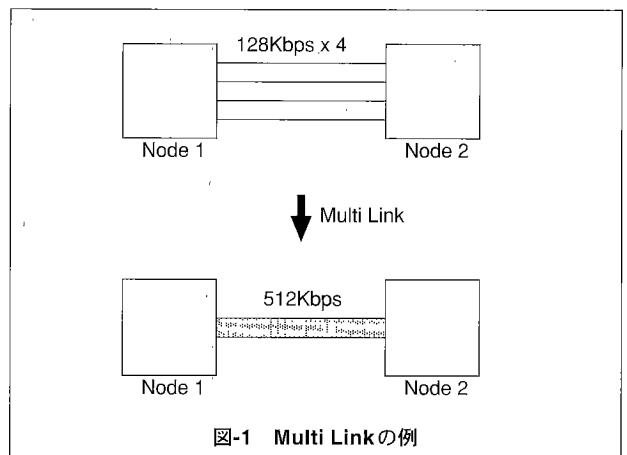
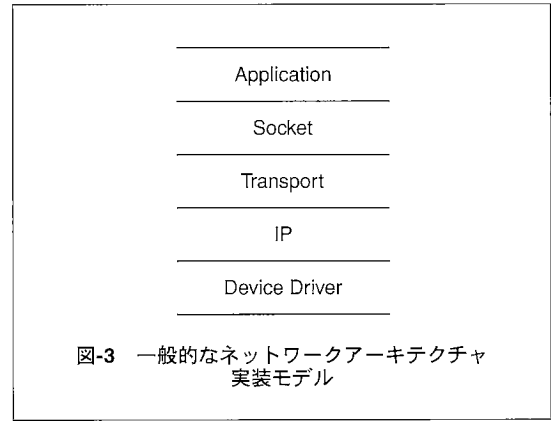
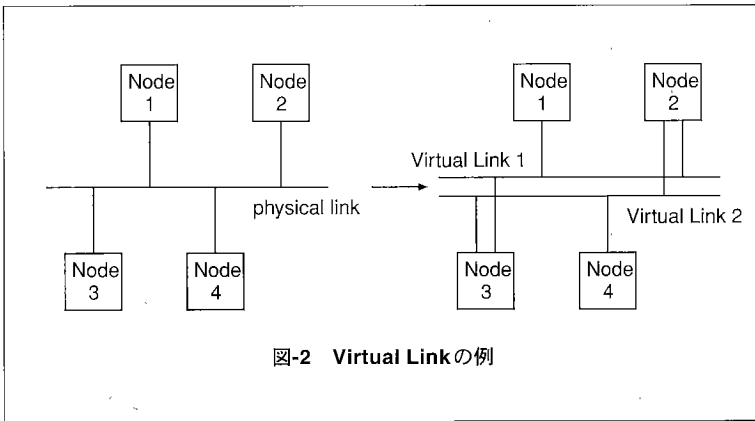


図-1 Multi Linkの例

\* (株)ソニー・コンピュータエンタテインメント  
komaki@rd.scei.sony.co.jp



リンクを一意に識別でき、リンクの分割を実現できる。

既存の Virtual Link 技術としては、ATM (Asynchronous Transfer Mode) の VC (Virtual Channel) や IEEE802.1Q<sup>2)</sup> で定義されている VLAN などがある。これらの技術は共に 1 本の物理リンク上に複数の通信路を構築するための技術であり、デバイス独自の技術であるため、実現の際にはデバイスドライバ層で独自の仮想デバイスを用意している。

### Multipath Routing

Multipath Routing とは、パケットの経路制御を行う際にパケットヘッダのパラメータを基に配送経路を選択する技術のことである。各パケットの特性はそれが属するフローによって異なり、適切なリンクも異なる。したがってパケットの種類、すなわちヘッダの各フィールド値に応じてどちらのリンクに配送するかを選択する機構が必要となる。このような場合に Multipath Routing が利用される。Multipath Routing によって選択されるリンクが 2 ノード間に限定される場合には、必ずしも IP 層でのルーティングである必要はなくなり、下位層で Multi Link の一種として実現することが可能である。この技術は複数の物理リンクを IP から隠蔽して抽象化し、IP に対しては仮想的な 1 本のリンクを提供する。その際、Multipath Routing は IP より下位層で行われる。

既存の Multipath Routing 技術としては、route<sup>3)</sup> がある。これらは共に、IP に独自の変更を加えることで IP 層で仮想リンク技術を実現している。

### ■ 既存の仮想リンク技術の問題点

既存の仮想リンク技術は、その設計上次のような問題点を抱えている。

#### IP 層やデバイスドライバ層への依存

すでに述べたように、既存の仮想リンク技術はすべて IP 層もしくはデバイスドライバ層において実現されている。その際、各技術はそれぞれが独自に設計を行い、独自に実装モデルに対して変更を加えているのが現状である。たとえば既存の Virtual Link 技術としては ATM の VC や IEEE 802.1Q で規格化されている VLAN などが存在するが、これらはデバイスドライバ層において

各デバイスごとに設計されている。そのため、任意のデバイス、すなわち任意のデータリンクに対して Virtual Link を実現することができない。

#### 仮想リンク技術同士の融合不可

複数の物理リンクを束ねる Multi Link 技術によって仮想リンクを構築し、その仮想リンクを用いて Multipath Routing を実現する場合、既存の技術は互いを考慮した実装を行っていないため、組み合わせることが事実上不可能である。

また、仮にすべての仮想リンク技術の融合を考慮した設計を行ったとしても、新たな仮想リンク技術が登場した場合には、また始めから、その仮想リンク技術を考慮に入れた設計をやり直す必要がある。

これは、1 つ目の問題点である IP 層やデバイスドライバ層への依存に加え、従来のモノリシックな実装方式自体が問題となっている。

仮想リンク技術がアドホックな実現手法を行っている現状では、個々の技術の実現は可能でも、仮想リンクを提供する枠組みとして汎用性、柔軟性に欠ける。では、なぜアドホックな実現を図っているのだろうか。先に述べたように、仮想リンク技術は物理リンクを IP から隠蔽して抽象化し、代わりに IP に対して仮想リンクを提供する技術である。つまり、概念的に仮想リンク技術は IP 層より下位層、かつ物理リンクであるデバイスドライバ層より上位層で提供すべきだといえる。しかし図-3 に示すように、既存のネットワークアーキテクチャ実装モデルでは IP 層とデバイスドライバ層は隣接しており、仮想リンク技術を提供すべき適切な層は存在しない。そのため現状では、仮想リンク技術は IP 層やデバイスドライバ層で独自に設計、実装を行わざるを得ないのである。

既存の実装モデルはインターネットが考案された当初に設計された。当時は計算機の性能やデータリンク技術が現在ほど発展しておらず、サービスやデータリンクは多様ではなかったため、ネットワークアーキテクチャにおいてネットワークインタフェース層は物理リンクであることを前提としていた。そのため、ネットワークインタフェース層を物理リンクであるデバイス

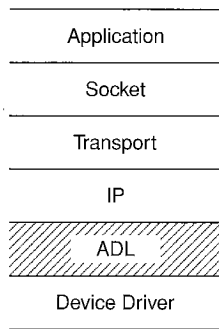


図-4 本研究で提案する新たな実装モデル

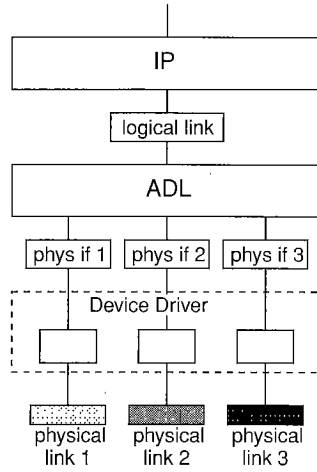


図-5 本提案モデルにおける Multi Linkの実現

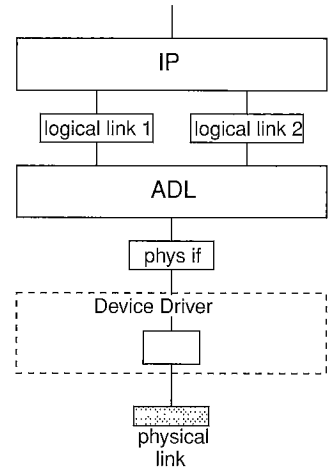


図-6 本提案モデルにおける Virtual Linkの実現

ドライバ層のみで実現してしまい、それは問題にならなかったのである。しかし近年の技術革新やサービス、データリンクの多様化により、ネットワークインタフェース層をデバイスドライバ層のみで実現することもはや限界となっている。そのため、従来の不十分な実装モデルにとって代わる新たな実装モデルが必要となってきている。

## 仮想リンク技術

### ■データリンクの抽象化を行う ADL 層の提案

本研究では、仮想リンク技術に柔軟に対応できない既存の実装モデルにとって代わる、新たな仮想リンク対応の実装モデルを提案する。

本研究で新たに提案する実装モデルでは、IP層とデバイスドライバ層の間に仮想リンク技術を提供するための層を新たに導入する。この新たな層を、ADL (Abstract DataLink) 層と名付ける。本提案モデルを図-4に示す。図-4に示す実装モデルでは、従来IP層やデバイスドライバ層でアドホックに実現されてきた仮想リンク技術を、すべてADL層に集約することが可能である。仮想リンク技術はデータリンクの抽象化を行う技術であることから、ADL層はデータリンクの抽象化を行う層であるといえる。

本提案モデルでは、ADL層の存在により従来デバイスドライバ層やIP層に依存していた仮想リンク技術を独立して扱うことができ、仮想リンク技術を提供する枠組みとして汎用性を実現できる。

### ■ADL層の提供する仮想リンク技術

以下に、ADL層によるデータリンクの抽象化の例として、Multi Link, Virtual Linkについて実装モデルの階層図とともに示す。

#### Multi Link

本提案モデルにおける Multi Linkの例として、3本の物

理リンクを束ねて抽象化し1本の仮想リンクをIPに提供することを考える。この場合の実装モデルの様子を図-5に示す。

図-5において、3本の物理リンクはADL層ですべて隠蔽され、IPはADL層によって提供される1本の広帯域仮想リンクのみを認識することが分かる。IPは単に1本の仮想リンクに対してパケットを出力し、複数の物理リンクへの分配等はADL層で行われる。

#### Virtual Link

本提案モデルにおける Virtual Linkの例として、1本の物理リンクを2本の仮想リンクに分割する様子を図-6に示す。

Virtual Linkの場合も Multi Linkと同様、IPは1本の物理リンクは認識せず抽象化された2本の仮想リンクのみを認識する。

### ■モジュール構造

既存の仮想リンク技術がIP層やデバイスドライバ層へ依存している問題は、本提案モデルでADL層を導入することにより、解決できる。しかしこれだけでは、仮想リンク技術同士の融合が不可能であるという問題点は解決されていない。これは、モノリシックな実装である限り、他の仮想リンク技術との融合はあらかじめそれを考慮して設計しないと不可能だからである。また、仮にすべての仮想リンク技術との融合を考慮して実装したとしても、新技術が登場した際には設計をやり直すことになるため、汎用性を備えた実現方法とはいえない。

そこで、ADL層の基盤となる枠組みに対してはモノリシックな実装を行い、枠組み内部ではモジュール構造を実現するという新たな実装方式を採用することで解決をはかる。モジュール構造の採用により、ADL層内部で Multi Linkや Virtual Linkなどの各仮想リンク技術は機能単位で分割され、分割されたそれぞれの機能はモジュールとして提供される。各システムでは、ADL層内部で目的の仮想リンク技術を実現するために必要なモジュール

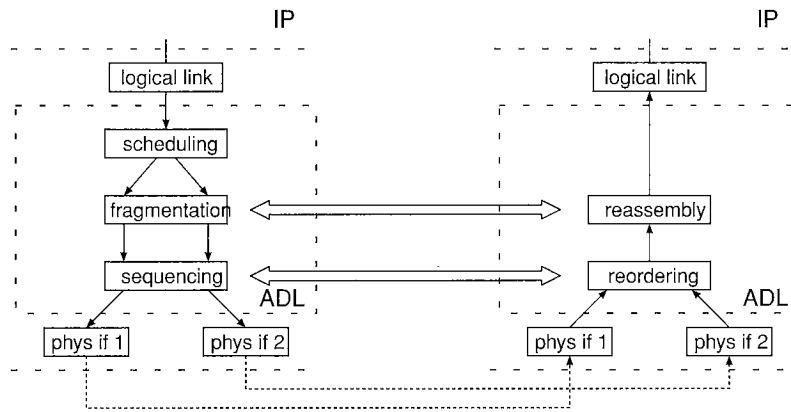


図-7 Multi Linkのモジュールグラフ

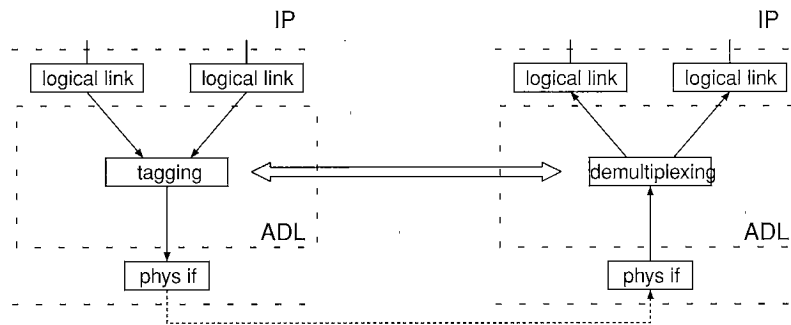


図-8 Virtual Linkのモジュールグラフ

ルを適切に組み合わせることでシステムを構築する。これにより、仮想リンク技術の融合を含むさまざまな利点を得られる。

モジュール構造は、モジュール本体とモジュール同士を接続するリンクによって構成され、木構造（モジュールグラフ）をとる。これにより、送信時に上から下へ、受信時に下から上へのパケットの経路がそれぞれでき上がる。また、Multi LinkやVirtual Linkのように任意の数の仮想リンクを提供するために、モジュールは複数の親、複数の子を持つことが可能である。

同一モジュールは必ずしも同一の挙動を示すわけではなく、与えられたパラメータにしたがって異なる動作をする。たとえば、Multi Linkの際には各物理リンクにパケットを分配するモジュールが必要となるが、この分配アルゴリズムにはラウンドロビンや重み付きラウンドロビンなどさまざまな方式があり、これは各システムがモジュールに対してパラメータとして指定できる。

例として、Multi Linkにおけるモジュールグラフを図-7に、Virtual Linkのモジュールグラフを図-8に示す。

従来のモノリシックな実装では仮想リンク技術の融合は実現不可能であったが、本提案モデルではモジュール構造を採用したことにより、ある仮想リンク技術を実現するモジュールグラフを改めて1つのモジュールと考えることができる。したがって、そのモジュールを多

段に組み合わせることで理論的には無限に仮想リンク技術の融合が可能となる。

## WIDE 合宿ネットワークでの運用

### ■ 1999年9月合宿での運用

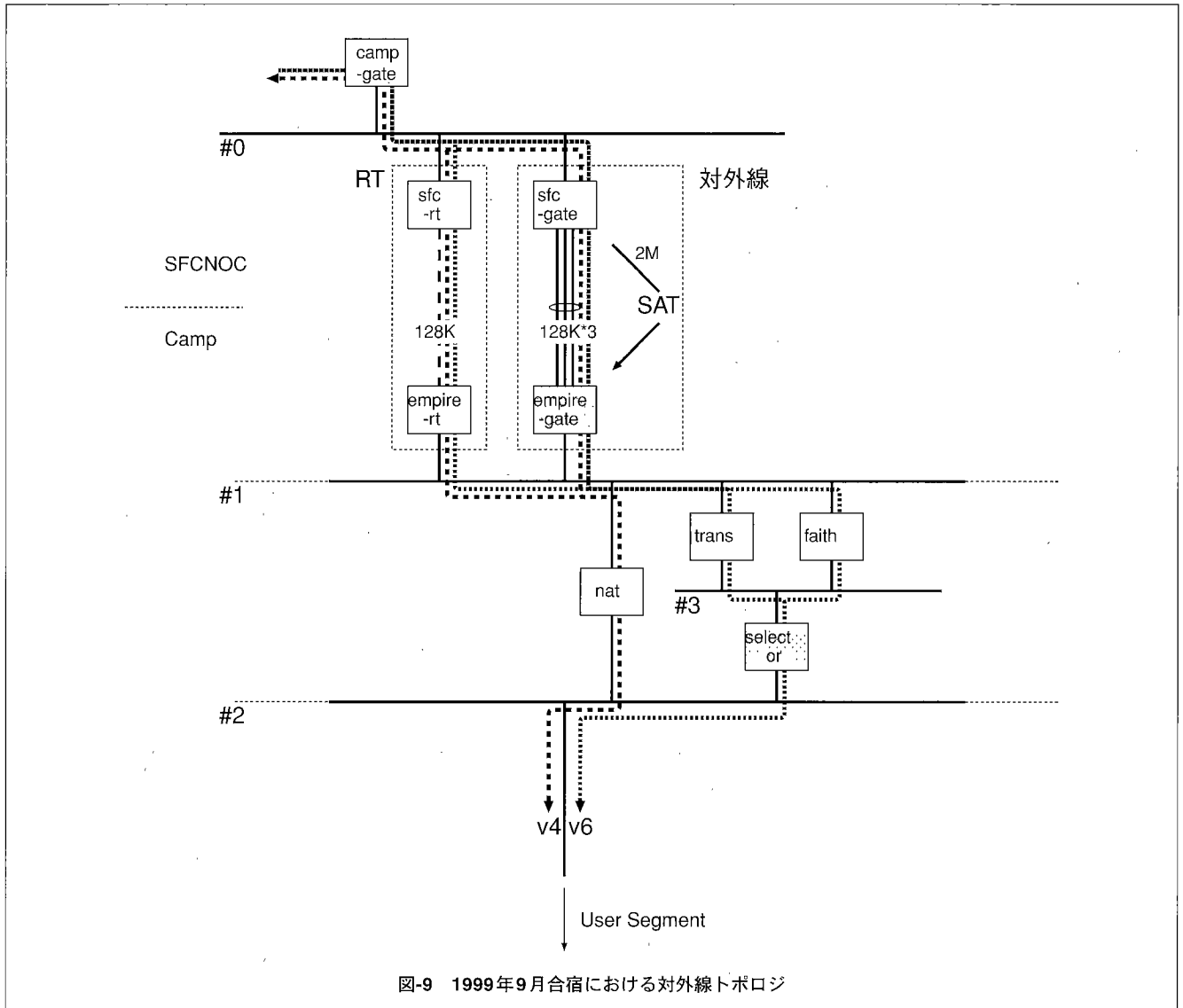
1999年9月合宿では、本研究で提案する実装モデルのプロトタイプの運用テストを対外線において行った。

#### ネットワーク構成

1999年9月合宿での対外線トポロジを図-9に示す。

対外線は128Kbpsの専用線を3本とISDN回線を1本、さらにSFCから合宿地への2Mbpsの衛星線を用意した。ISDN回線はヤマハのIPv6対応ルータ（RT）実験において使用された。これをRT線と名付ける。本実験では専用線3本と衛星線を利用し、それらの線を接続する一対のルータ（sfc-gate, empire-gate）を実験マシンとして使用した。以降では、本実験で使用した専用線および衛星線を対外線と表記し、それらを接続するルータを対外線ルータと表記する。

合宿地のIPv4ホストはNATルータであるnatのプライベートセグメント内に位置し、IPv4トラフィックはすべてnatを経由してRT線および対外線を通った。IPv6ホストにはグローバルアドレスが割り当てられ、IPv6トラフ



ックはすべて selector を経由して RT 線、対外線を通った。selector は IPv6 Multipath Routing 機構を備えており、外向きの IPv6 トラフィックは selector においてプロトコルによって trans, faith それぞれに経路を振り分けられた。

トラフィックが RT 線と対外線のどちらの線を通るかは静的経路で設定された。その経路は、内向きのトラフィックは camp-gate, 外向きのトラフィックは nat や faith, trans において設定された。

### 実験内容

本実験では、SFCNOC と合宿地にそれぞれ設置した対外線ルータにおいて、ADL 層を実装した。本実験は、複数の物理リンクを ADL 層で隠蔽し、IP に対して仮想リンクを提供することを目的であった。そのため、合宿で利用する対外線は複数の異なる物理リンクが望ましく、128Kbps の専用線 3 本と 2Mbps の衛星線という対外線構成になった。専用線 3 本と衛星線は ADL 層で抽象化され、上位層に 1 本の仮想リンクを提供する。

実験には、本実装モデルのプロトタイプとして PPP を利用した。Point-to-Point リンクでのデータグラム配送方式を提供する PPP は、概念的に IP 層より下位、かつデバイスドライバ層より上位に位置するプロトコルであ

る。そのため、ADL 層を疑似的に実現するのに適しているといえる。PPP 実装としては、OS は FreeBSD 3.2-Release を利用し、PPP には FreeBSD 付属の Userland PPP を利用した。Userland PPP の実装モデルにおける位置付けと本提案モデルとの対応を、図-10 に示す。

実装は、Userland PPP に対して仮想リンク技術を追加する形で行った。ADL 層で対外線を抽象化する際、128K の専用線 3 本を Multi Link によって束ね、その束ねた 384K の仮想リンクと衛星線をさらに Multi Link した。この 384K の仮想リンクと衛星線の間では Multipath Routing を行い、IP からは単に 1 本のリンクが認識される。具体的には、Userland PPP に多段 Multi Link や Multipath Routing の技術を追加し、Userland PPP が使用するトンネルデバイスを仮想リンクとして IP に提供した。

### 実験結果

1999 年 9 月合宿の実験は、対外線接続の確保に問題があり、結果としてはうまくいかなかった。以下にその要因を挙げる。

### TA 問題

3 本の専用線を接続するためには計 6 台の TA が必要

であり、それは機材募集により事前に確保できていた。しかし、専用線接続に対応したTAについての調査を怠ったため、6台のTAの中に専用線接続に対応していないTAが含まれていた。それに気付いたのが合宿直前で、camp-netチームを混乱させ、新たなTAを確保するのに手間取ってしまった。代替策として、TAをルータとして機能させることで専用線接続を実現できるため、その上でPPP over TCPの技術を利用することによりTAの問題は解決した。

結局、合宿でのTAの構成は専用線3本のうち専用線接続が2本、ルータ機能を使用してPPP over TCPでの接続が1本で行うこととなった。

**接続問題**

合宿での対外線状態は良好ではなかった。まず衛星回線が機材の故障により合宿を通して使用できなかったことが挙げられる。また、3本の地上線の使用状況については以下の通りだった。

- 1本目 (PPP over TCP) … 前泊時に接続：1本目のTAに関しては、SFCNOCに設置してきたTAはシリアルケーブルで合宿地のルータと接続し、合宿地からリモートで設定できたため、前泊日につながった。
- 2本目 (専用線接続) … 合宿1泊目の昼に接続：2本目、3本目の地上線は専用線を接続する両端のTAの設定に手間取っていたために使用開始が遅れた。また、設定の変更を反映させるためには本体の電源を入れ直す必要があったため、SFCNOCに設置してきたTAをリモートで設定するのに非常に手間取った。  
2本目の地上線に関しては、合宿当日にSFCにいたメンバに電話を通じて電源を操作してもらいながら設定し、合宿1日目の昼にアップした。
- 3本目 (専用線接続→PPP over TCP) … 合宿3日目の午前に接続：3本目の地上線は、合宿地側に接続するTAとPCを接続するシリアルケーブルを忘れてしまい、それをどうやって接続するかで非常に手間取った。このTAのシリアルケーブルは特殊な配線のため、合宿地でケーブルを作成してみるなどいろいろ試したが、結局接続できず、最終的にはこのTAの使用を諦めた。2日目の夜にcamp-gateがSFCNOCの電源問題によりダウンしたため、問題解決のためにSFCNOCに戻ったcamp-netチームのメンバにSFC側のTAを交換してもらった。この際、代替TAはルータ機能を用いて128K接続する機種であったので、3本目の地上線にはPPP over TCPを利用した。以上の経緯により、3本目の地上線は合宿3日目の午前に接続した。

結局、本合宿中の対外線の帯域は、以下のようになった。

- 合宿1日目～合宿3日目午前：対外線256K + RT線 128K
- 合宿3日目午後～：対外線384K + RT線 128K

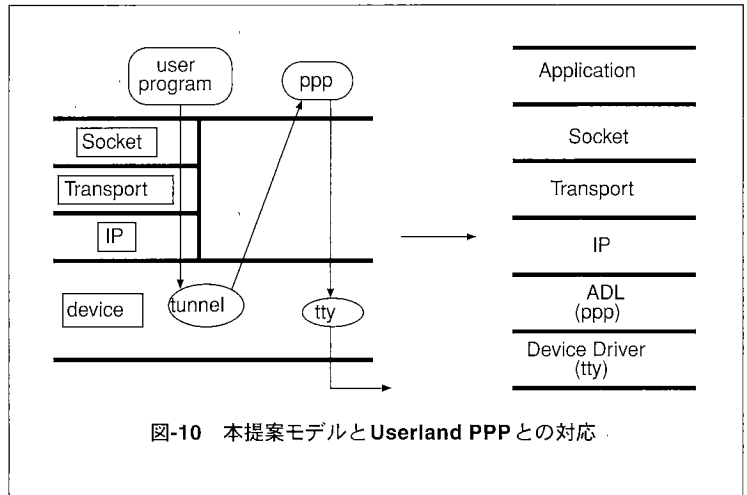


図-10 本提案モデルとUserland PPPとの対応

**PPP問題**

PPPはリンクレベルでのネゴシエーションを行うため、ネゴシエーションパケットは往復で同一インタフェースを使用する必要がある。しかしこれは、PPP over TCPのトンネルや片方向の衛星線において問題となった。なぜなら、片方向の衛星線では復路のパケットが衛星線を通らず、PPP over TCPでは往復のパケットが同じ専用線を通らない場合があるからである。この問題を解決するには、インタフェースに対するエイリアスアドレスの設定や、別経路の設定が必要であった。3本目の地上線を接続する際にこの問題に直面し、この解決法を見つけ設定を行うまでに相当量の時間を要した。

**接続性問題**

対外線は接続された後も良好とはいえず、以下の理由により非常に混雑していた。

- 合宿中の対外線は、衛星線が利用不可能だったために地上線に全トラフィックが集中してしまい、非常に混雑した。
- Userland PPPであったためにカーネル内での処理に比べて余計に負荷がかかった。
- PC側のシリアル回線にオンボードのシリアル端子を利用したため、115.2Kしか出なかった。
- PPP上で圧縮をかけなかった。

当初は衛星線は存在するものと考えており、バーストトラフィックはすべて衛星線を通るという前提があった。そこで地上線に対する混雑度は低いと予想したため、Userland PPPの使用を決定した。しかし衛星線が機材の故障により使用不可能となったため、そのトラフィックがすべて地上線に集中し、このような事態になってしまった。

**反省点**

本合宿での運用テストでは、いくつかの反省点がある。以下にそれを述べる。

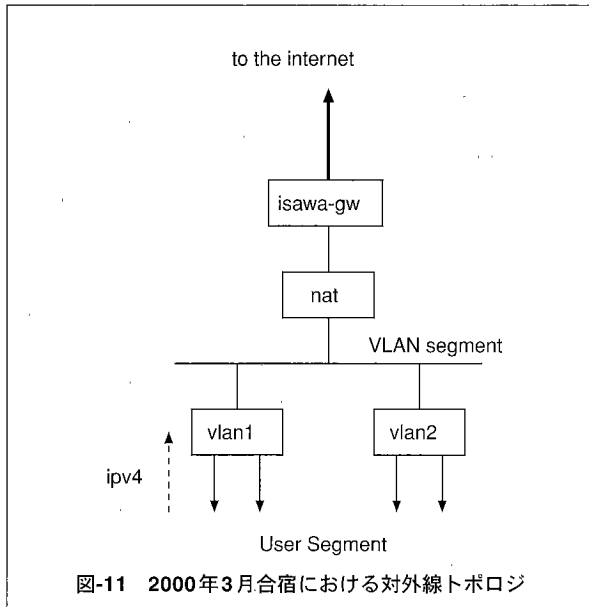


図-11 2000年3月合宿における対外線トポロジ

- ホットステージ等の事前の準備において、合宿のトポロジをシミュレーションしたテストが不十分であった。配線等も含めて、より正確なテストが必要である。
- 非常事態にも対処可能なように、予備のバスを用意できるPCを使用すべきである。
- 対外線トラフィックを合宿地において常にモニタし、トラフィックの変化や誤りの検出、トラブルシューティングに用いるべきである。

## ■ 2000年3月合宿での運用

2000年3月合宿における実験では、1999年9月合宿のプロトタイプ実験結果を踏まえ、モジュール構造も含む本実装モデルに基づいた実装を対外線においてテストした。

### 実験内容

2000年3月合宿での対外線トポロジを図-11に示す。合宿地内では、IPv4ホストはNATルータであるnatのプライベートセグメント内に位置し、IPv4トラフィックはすべてnatを経由して外部との通信を行う。

本実験では、ADL層をカーネル内で実装したシステムの実験を行う。nat配下の合宿地内のネットワークにおいて、nat、vlan1、vlan2の間でVirtual Linkセグメントを構築し、ADL層によって1本の物理リンクを隠蔽して4本の仮想リンクに分割する(図-12)。natを経由するトラフィックはIPv4のみであるため、Virtual Linkシステムを利用するのはIPv4トラフィックのみである。

### 結果

今回の合宿では、1999年9月合宿に比べると格段に安定したネットワークを供給できた。これには、以下のようない理由が挙げられる。

- Userlandでの実装ではなくカーネル内実装であったために負荷に対してある程度頑強であった。
- 対外線での実験でなく合宿地内での実験であったため

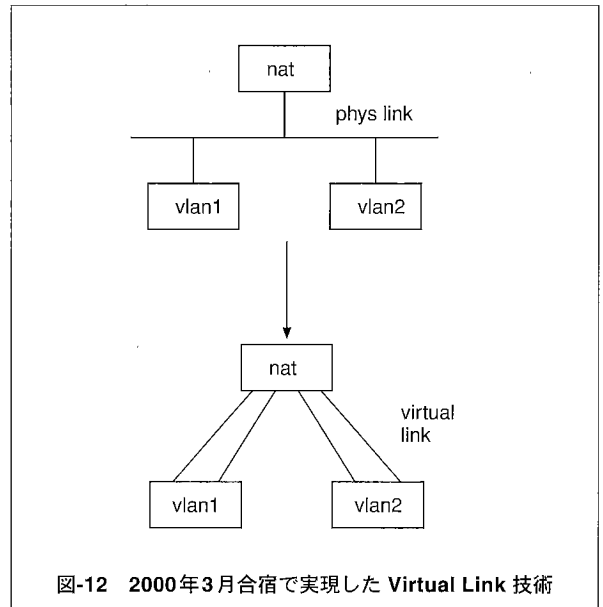


図-12 2000年3月合宿で実現した Virtual Link 技術

めに機材の問題もなく、事前の合宿トポロジのシミュレーションを容易に行うことができた。

- 合宿前のホットステージにおいて、ほぼ完全に合宿トポロジを構築し、検証を行うことができ、この時点で問題なく動作していた。

### 反省点と今後の課題

今回の実験では、ADL層においてVirtual Linkを実現する実験であったが、今後はVirtual Linkのみでなく、Multi Linkや Multipath Routingなども組み合わせたシステムも必要となってくる。また、今回の実験中、仮想リンクのIPアドレスが変更されたり、ある特定のフラグメント化されたパケットの通信において不具合が生じるなどの問題があった。この問題の原因についてはいまだ説明できておらず、natでのnatdとの関係も含めて、突き詰めていかなければならない。

### おわりに

本稿では、仮想リンク技術を考慮した実装モデルについて概説し、その実装モデルを実現しWIDE合宿ネットワークにおいて行った運用テストについて述べた。今後ますます多様化が進み重要性を増していく仮想リンク技術を利用するうえで、IP層やデバイスドライバ層に依存しない仮想リンク技術の実現、および仮想リンク技術同士の融合は必要不可欠なものとなる。その上で、本提案モデルは非常に重要な意味を持つものとなるであろう。

### 参考文献

- 1) Sklower, K. et al.: The PPP Multilink Protocol (MP), IETF, RFC 1990 (Aug. 1996).
- 2) ANSI/IEEE Draft Standard P802.1Q/D10: IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Virtual Bridged Local Area Networks, IEEE (Mar. 1998).
- 3) 小巻賢二郎, 所真理雄: フローを考慮した経路制御表, 電子情報通信学会, 情報ネットワーク研究会技術研究報告書 (1998).
- 4) 小巻賢二郎, 長健二郎, 所真理雄: テータリンクの抽象化に基づいたネットワークアーキテクチャの提案, 日本ソフトウェア科学会, Workshop on Internet Technology (1999).

(平成13年1月31日受付)

