
◆招待論文◆

AI³プロジェクトにおける SFCの活動

The Activities of the AI³ Project in SFC

渡部 陽仁

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科特別研究助教

Haruhito Watanabe

Research Associate, Graduate School of Media and Governance, Keio University

本稿では、AI³プロジェクトの設立から今日に至るまでの、当プロジェクトにおけるSFCの活動を紹介します。SFCは、当プロジェクトを通して、衛星通信回線を用いたインターネット通信技術の開発、東南アジア地域におけるインターネット通信基盤整備、マルチキャストネットワークの構築、遠隔教育、人材育成など、実に様々な活動を行い、大きな成果を挙げている。本稿では、その概要を紹介する。

This paper describes the activities of the AI³ Project in SFC. Using satellite links, this project gives contributions to the society by: developing Internet technologies using satellite links, operating an Internet infrastructure for southeast Asian region including a multicast network, and distance education.

Keywords: インターネット、衛星通信、遠隔教育、途上国支援

1 AI³プロジェクト

慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス (SFC) による東南アジア地域のインターネット通信基盤整備の取り組みは、1995年のAsian Internet Interconnection Initiatives Project (AI³)^[1] 設立をきっかけに始まった。AI³は、インターネット通信技術の共同研究を目的として、アジア地域の研究機関が共同で設立した国際研究コンソーシアムである。SFCは本プロジェクトの設立発起メンバーとして、設立時から現在まで、中心的な役割を果たしている。技術開発を目的として設立した本プロジェクトであるが、その進行の過程で、東南アジア地域のインターネット通信基盤の整備にも大きな役割を果たすこととなった。東南アジアの参加国は、本プロジェクトを通して、SFCからインターネットの最新技術と運用ノウハウを学んだ。そして、本プロジェクトの参加組織および参加研究者が自国のインターネット通信基盤整備を主導し、現在の東南アジア地域のインターネット通信基盤発展につながった。

AI³が整備運用する研究開発用ネットワークをAI³ネットワークと呼ぶ。その最大の特徴は、衛星通信回線を用いていることである。1995年のプロジェクト設立当時は、東南アジア地域の情報通信インフラが未発達であったため、参加組織を地上の専用回線で相互接続することが困難であった。そのため、AI³では衛星通信回線を用いた国際バックボーンの構築を開始した。衛星通信回線は、地上回線の整備状況に関わらず利用でき、用途に応じて自由にネットワーク構成を変更できる利点がある。プロジェクト開始時点では、地上回線と比較して大きな帯域を確保しやすいという優位性もあった。AI³ネットワークは日本の奈良先端技術大学院大学 (NAIST) をハブとしたスター型トポロジから始まり、1996年にポイントツーポイントリンク (P2Pリンク) によってInstitut Teknologi Bandung (ITB, Indonesia), Asian Institute of Technology (AIT, Thailand), Hong Kong University of Science and Technologies (HKUST, HongKong) の3組織を接続した。AI³ネットワークを共同で運用し研究開発を行うこれらの組織をAI³パートナーと呼ぶ。その後、AI³パート

ナーの増加と衛星通信回線を片方向に用いたブロードキャストリンク (Uni-Directional-Link, UDL) の利用開始によって、AI³のネットワーク構成は大きく変化した。そうした変化の最も大きな理由は、地上回線の帯域が著しく増加し大幅にコストダウンしたのに対し、衛星回線では限られた周波数帯域を効率的に利用することが序々に求められてきたからである。同様に、衛星インターネットにおける主な研究対象は、高遅延広帯域回線における高速通信技術から、高遅延狭帯域の回線をできるだけ効率的に利用する最適化技術へ移り変わった。また、商用の衛星インターネットも、狭帯域な地上回線と広帯域な衛星通信回線を併用するモデルから、地上回線が全く利用できない地域に衛星回線による双方向インターネット接続サービスを安価に提供するモデルへと変化した。

本稿では、東南アジア地域のインターネット通信基盤整備に大きな役割を果たした、AI³ネットワークについて述べる。そして、SFCを中心に開発され、AI³ネットワークに適用した最適化技術とその運用方法を述べる。また、UDLおよびUDLR (Uni-Directional-Link-Routing)^[2] 技術の実証実験、アジア規模の広域遠隔教育活動におけるインフラストラクチャとしての利用、UDLにおけるマルチキャスト、アジアへのIPv6の普及、津波やサイクロン被災地へのインターネット通信環境の緊急提供など、AI³を通じたSFCによる活動を報告し、今後の展望を述べる。

2 AI³ネットワークの構成と変遷

AI³ネットワークの変遷は、図1に示す4つのフェーズに別れる。フェーズ1は発足当初のスター型ネットワークトポロジである。フェーズ1では、比較的小型のアンテナで通信可能なことからKuバンドが利用された。また、Cバンドは法的に利用できない国が存在したことも、Kuバンドを利用した理由であった。現在のAI³もスター型トポロジを残している。その理由は、多組織が接続してもリンク数が著しく増加しないこと、全ての参加組織間が最大2ホップの衛星回線で通信できることで

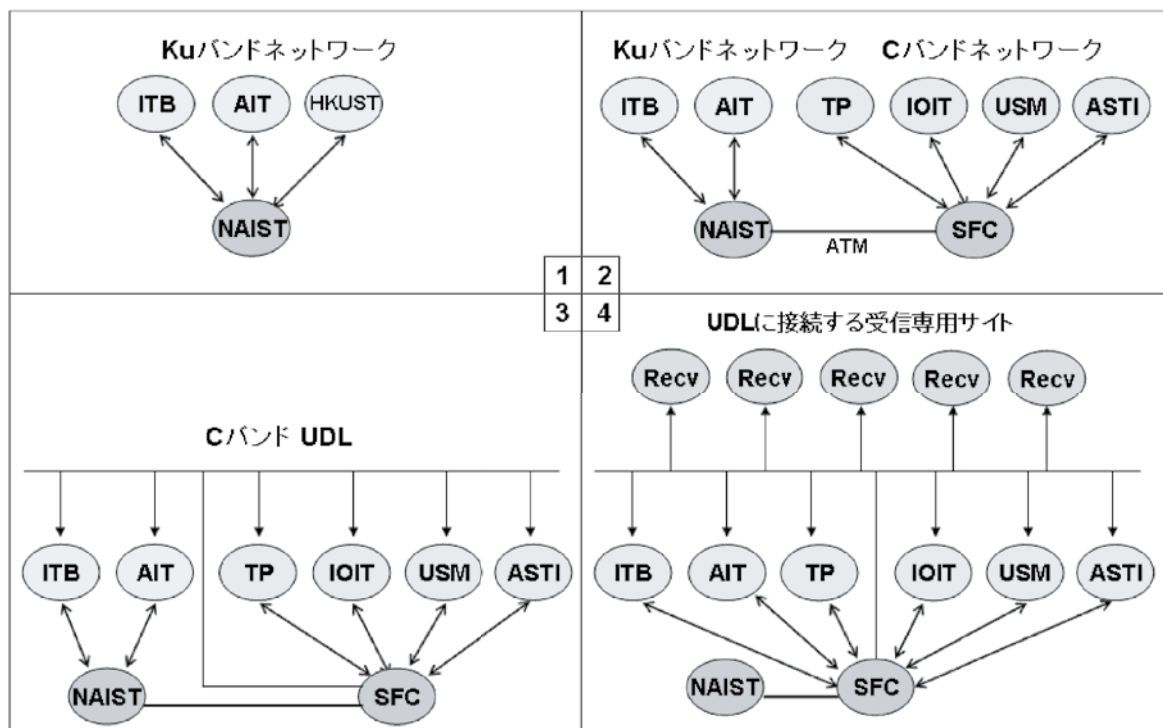


図1 AI³ ネットワークの変遷

ある。また、AI³は「実験ネットワークの運用を通して全ての参加グループが技術知識と運用経験を共有する」ことを目的とし、各参加組織における固有の経路制御ポリシーを実現するため、フェーズ1はレイヤ3の国際IX(Internet Exchange)として運用した。AI³はAS番号4717を持つ自律システムとして現在も運用を続けており、WIDE(AS2500)、APAN(AS7660)を上流、AIT(AS4767)、ITB(AS4796)、ASTI(AS9821)を下流としたトランジット接続を行っている。こうした自律システムとしての運用は、ネットワークの構成要素を増加させる反面、AI³独自の経路制御ポリシーを実現し、運用を通して共有できる技術知識や経験が大きく向上する利点がある。

フェーズ2では、Kuバンドと比べて降雨減衰が少なく多雨地域での安定運用が期待できるCバンドの利用を開始した。CバンドのネットワークはSFCをハブとして新たに構築し、Temasek Polytechnic (TP, Singapore), University of Science Malaysia (USM, Malaysia), Advanced Science and

Technology Institute (ASTI, Philippines), Institute of Information Technology (IOIT, Vietnam)が参加した。NAISTとSFCを10MbpsのATM回線で接続し、KuバンドネットワークとCバンドネットワークを相互接続した。^[3]

フェーズ3では、AI³パートナーがハブ(NAIST及びSFC)から大量のトラフィックを受信するため、Cバンドを用いた広帯域のUDLを導入した。各パートナーは、ハブ局と接続する既存のP2Pリンクに加えて、UDLを受信専用の共有リンクとして利用する取り組みが始まった。UDLを導入したもう一つの理由には、AI³ネットワークを通信基盤に利用した広範囲への均質で高品質な授業配信が望まれたことがあった。UDLの導入と同時に、UDLRを用いた経路制御の実証実験が開始された。

フェーズ4では、アジア規模の遠隔教育プロジェクト(SOI Asia)^[4]が発足し、その参加を目的としてアジア各地の教育機関(SOI Asiaパートナー)が接続した。SOI AsiaパートナーはAI³のUDLに受信

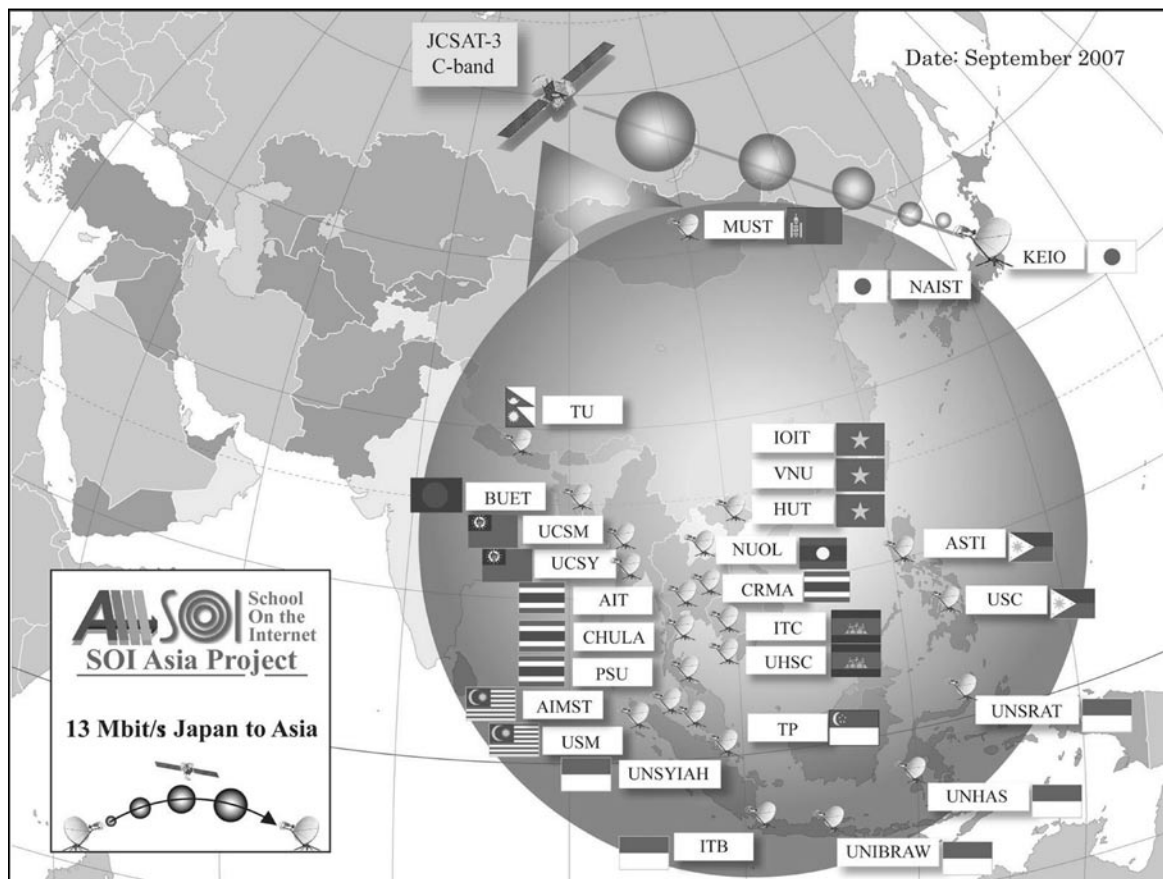


図2 現在のAI³ネットワーク

専用で接続し、送信に現地のISPを用いてUDLRによる双方向通信を行っている。こうした受信サイトは2005年5月31日現在で11存在する。これらSOI Asiaパートナーの多くはインターネットの利用が発展途上段階の地域から参加しており、AI³パートナーの中にも自律システム化が困難な組織が存在したため、AI³ネットワークは国際IXから内部に複数の接続組織を含むトランジットASへと変化した。また同時期、Kuバンドを用いた衛星ネットワークの運用経験が十分に蓄積され、UDLの展開によってネットワークの比重がCバンドに大きく傾いたため、Kuバンドネットワークが廃止され、NAIST、ITB、AITはCバンドに接続を変更した。2008年7月現在のAI³ネットワークを図2に示す。

3 帯域の効率的利用

インターネットにおけるトラフィック量の増加は、AI³内においても例外なく生じている。これに加えて、AI³はSOI Asiaなどの高品質なマルチメディアコミュニケーションの要求に応える必要がある。これに対し、衛星通信回線は地上回線と比較して帯域あたりの利用料金が高く、金銭的な理由から回線増強が困難である。この問題を解決するため、AI³ネットワークでは保持している帯域の効率的な利用を目的に様々な手法を用いたネットワーク構築と運用を行っている。衛星回線では地球局の性能や許容されるエラー率に応じて最適な無線変調方式とエラー訂正方法を選択する必要があり、無線変調方式に8PSKまたはQPSK、誤り訂正のためFECを1/2から3/4の比率で適用している。

一方、インターネットにおいて衛星通信回線を利用する場合は、以下に示す効率化手法が考えられる。

- 1) 各回線への帯域割り当てを最適化
- 2) 広帯域の回線にトラフィックを集約
- 3) 利用用途や通信量に応じた帯域の動的な割り当て
- 4) パケットの圧縮や、通信量を減らした独自プロキシの利用など、アプリケーションレイヤにおけるトラフィック量の削減

1)の手法に関して、AI³では年に数回、一定期間のトラフィック量や回線の利用用途に応じた帯域割り当ての見直しを行っている。図3は、AI³における現在の無線帯域の割り当て状況である。衛星回線は、ある無線帯域を分割し、各地球局に割り当て、それに基づいて地球局を設定し通信を行う。トラフィックが少ない回線の帯域を減らしトラフィックが多い回線により大きな帯域を割り当てることで、帯域の有効活用を図れる。帯域の再配置は複

数の回線に影響するため、複数の地球局の設定を同時に変更する必要がある。このため、ネットワーク内の地球局を一括して制御するシステムが必要であり、DVB-RCSをはじめ、いくつかの規格が標準化されつつある。しかし、既存のシステムの多くは各社独自の仕様に基づいていたり、設定できる変調方式に制限が存在したりする。そのためAI³では、これらの影響を受けない独自の帯域割り当てシステム(Dynamic Bandwidth Allocation system, DBA)^[5]を開発し利用している。DBA導入以前は、帯域の再配置にあたって現地のオペレータが直接衛星モデムを操作する必要があったが、現在は遠隔地から一人のオペレータが複数の衛星モデムを同時に操作可能になり、帯域の再配置に必要な運用コストが大きく軽減された。

2)、3)の手法は、UDLの利用を通して実現しており、次節で述べる。4)の手法は、既存のアーキテクチャの多くがネットワークの利用方法や運用方法を限定し、AI³の多様なネットワーク利用に即さないため検討段階である。

AI³ frequency allocation

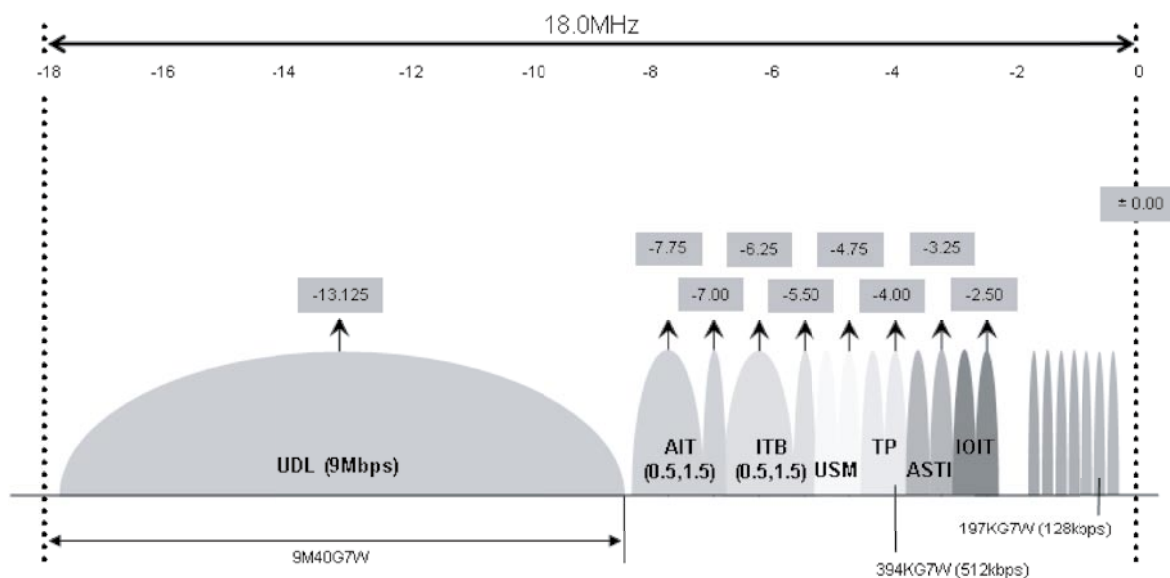


図3 帯域割り当て表

4 UDL の利用

4.1 トラフィックの集約

図1が示すように、フェーズ2までのAI³ネットワークは多数のP2Pリンクで構成されていた。これらのP2Pリンクはトラフィック量に応じて適切な帯域を割り当てられていたが、そうした回線の再配置は年に数回であった。これに対し、インターネットのトラフィック傾向は曜日や時間帯によって大きく変化し、一時的に多くの帯域を消費するアプリケーションも存在する。このため、輻輳によるパケットロスが多く発生している回線や、一部の期間を除いて帯域を十分に利用していない回線が存在した。その後、DBAによって定期的な帯域の再配置は簡単化されたが、そうした回線設定の変更はプロジェクト全体の意思決定が必要であったり、定常運用にあるシステムに毎回影響を与えたりするため、頻繁に行うことが困難である。また、トラフィックの増加傾向やアプリケーションに求められる品質向上に対し、各P2P回線を必要に応じて増強する手法では間に合わないことが予想された。そこで、AI³は

既存のP2P回線に比べ広帯域なUDLを導入しパートナー全体の共有回線として運用を開始した。UDLへの送信ルータ(以下フィーダ)をハブ局(SFC)に設置し、受信ルータ(以下レシーバ)を各パートナーに順次設置した。UDLの導入によって、ハブ局からパートナーへのトラフィックをUDLに集約できるようになり、突発的な傾向が強いトラフィックに余裕を持って対応可能になった。また、UDLの利用効率が高いことによって、AI³の帯域全体をより効率的に利用できるようになった。

4.2 帯域の自動割り当て

UDLの導入以後、AI³ではP2PリンクとUDLにトラフィックの負荷分散を行っている。各P2Pリンクにおいてトラフィック量が閾値を上回ると、プロジェクト内部で開発したポリルーティング機構によって、ハブ局から該当するパートナーへ送信するトラフィックが、P2PリンクからUDLに分散される。トラフィックの振り分けはTCPのセッション単位で行われる。本機構の概要を図4に示す。ポ

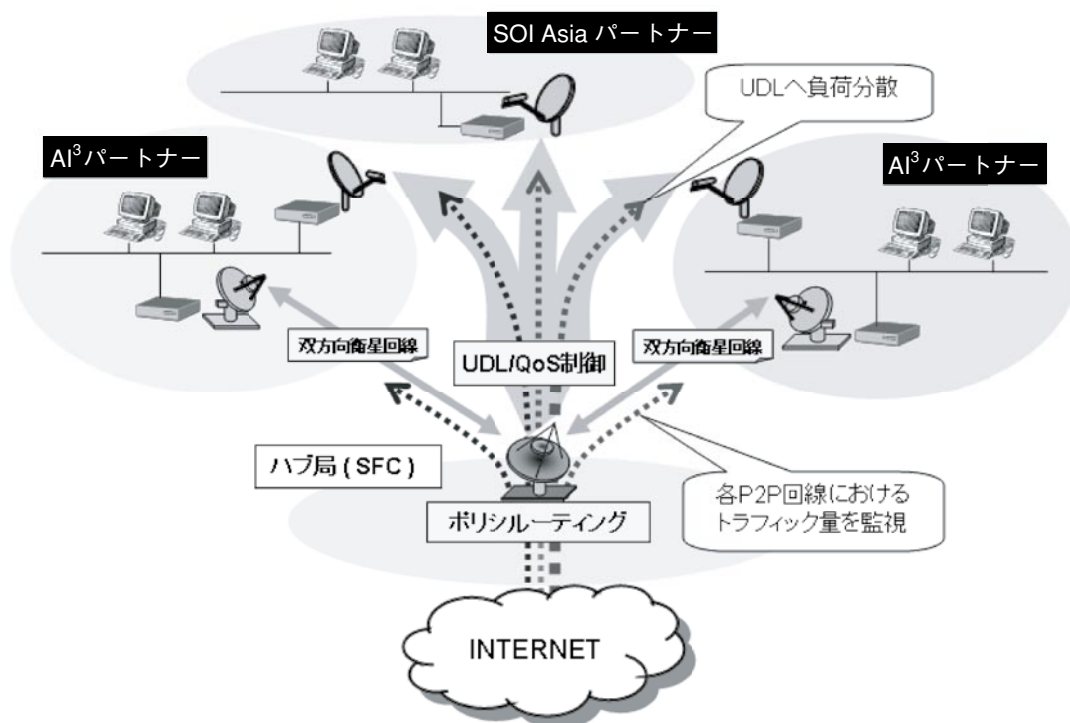


図4 policy routing

リシルーティングにより、AI³では既存のP2P回線とUDLの帯域が無駄なく消費されている。しかし、最近UDLの帯域が非常に大きく消費され、新たな問題になっている。そのため、現在はUDLの帯域を利用用途ごとに分配し優先制御している。帯域の分配には、ALTQ(Alternate Queueing for BSD UNIX)に実装されているHFSC(Hierarchical Fair Service Curve)アルゴリズムを利用している。HFSCでは、分配された帯域のうち利用されなかった分が他の用途に自動的に消費される。以上のように、ポリシルーティングとHFSCによる優先制御は、UDLにおける帯域の自動分配を実現しており、3で述べた手法の3)に相当する。

5 SOI Asia との連携とマルチキャストへの要求

5.1 受信サイトの構築

UDLの受信局は無線機器の導入コストが既存のVSAT(Very Small Aperture Terminal)システムと比べて格段に低く、電波の送信を伴わないために地球局免許が不要である。これを利用し、UDLを広帯

域な下り回線として用いた多数の受信サイトが構築された。これらの受信サイトは前述したSOI Asiaパートナーである。受信サイトはUDLRによってAI³内部で双方向通信を行っている。UDLRは、受信専用であるUDLと、送信機能を持つ他の回線を併用し、フィーダとレシーバがUDL上で双方向通信するための技術である。レシーバは、UDLに送信するパケットを、他の回線を用いたトンネリングによってフィーダへ送信する。フィーダは、受信したパケットが自分宛であった場合、それをUDLから受信したパケットとして扱う。また、受信したパケットが他のノード宛であった場合やマルチキャスト(ブロードキャスト)パケットの場合、レシーバの代わりにUDLへ送信する。このように、UDLRは、UDLを通常のブロードキャストリンクにエミュレーションし^[2]、これによって経路制御機構、データリンクアドレス解決機構、IGMPといったインターネットの基盤技術を正しく動作させる。レシーバからフィーダへのトンネリングは、GRE(Generic Routing Encapsulation)を利用する。図5に、UDLRの概要と標準的な受信サイトのネットワークポ

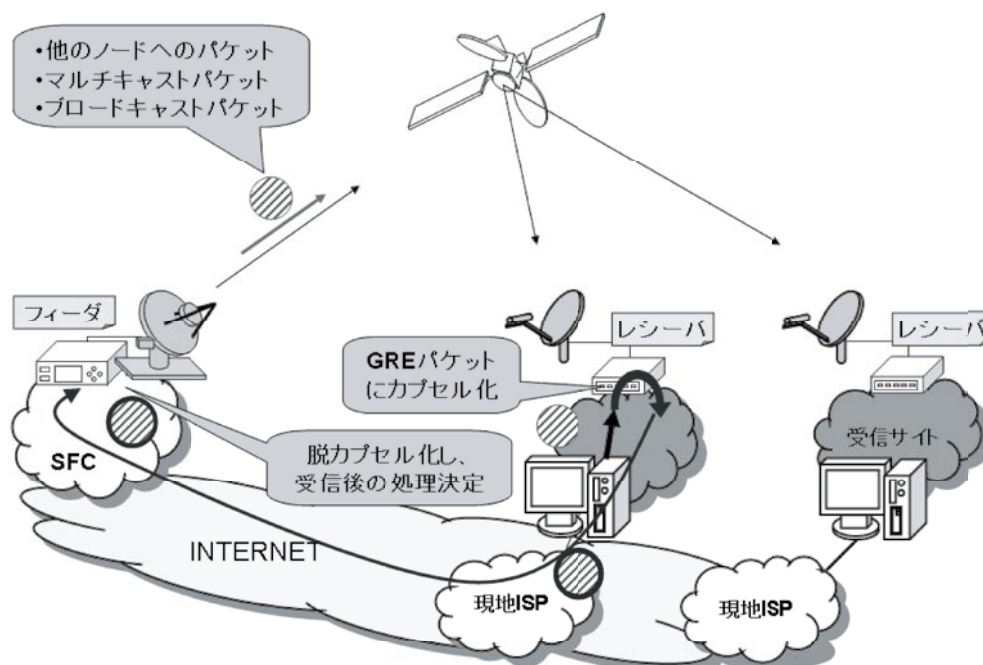


図5 UDLRと受信専用サイト

ログを示す。UDLRを利用するため、SOI Asia パートナーは、UDLを提供するAI³と、レシーバからの送信に利用する現地ISPの両方に接続している。UDLRを用いたネットワーク運用においては、GREによってカプセル化されたパケットをフィルタし破棄するISPの存在が明らかになった。中間ISPによるこうした運用は、UDLR利用の障害になり、解決までに時間を要する。今後は、利用するISPへの十分な告知と共に、GRE以外のカプセル化手法を利用するなど自律的に問題を回避できる手法が必要である。

5.2 UDLにおけるマルチキャストルーティング

SOI Asiaでは、UDLを介して双方向のリアルタイム授業や講義マテリアルの配信を実施している。授業実施時は、日本から各受信サイトへ約3.5Mbpsの映像と音声トラフィックをマルチキャストで送信する。各受信サイトからは、UDLRを利用して低解像度の映像や音声UDL上にマルチキャストされ、日本へのフィードバックや教室間のコミュニケーションに利用される。これら受信サイトからのマルチキャストトラフィックは、合計約1.5Mbpsである。一方、ルーティングプロトコルにPIM-SM^[6]を利用する場合、レシーバがUDLを経由してマル

チキャストトラフィックを受信するためには、各レシーバにおいて、マルチキャストの送信者への経路をフィーダに向ける必要がある。その理由では、PIM-SMにおいてマルチキャストの上流ルータを選ぶ基準は、「マルチキャストの送信元への最短パスにあたる次ホップルータであること」だからである。しかし、そうした環境では、レシーバ及びその下流のノードからマルチキャストの送信元へのユニキャストトラフィックは、図6の左に示すように必ずUDLRのトンネリングを経由してフィーダに転送され、不必要なオーバーヘッドを伴う。この問題を解決するため、AI³ではRP(Rendezvous Point)をフィーダのUDL側インタフェースに設定し、レシーバおよびその下流のルータが必ずRPT(Rendezvous Point Tree)を使うと設定している。レシーバからRPへの最短経路はUDL上のオンリンク通信であるため、レシーバは必ずマルチキャストの上流ルータにフィーダを選択する。これにより、レシーバおよびその下流ノードは、図6の右に示すように、マルチキャストの送信元への経路をUDL以外の回線を用いた最短経路に設定可能になり、UDLRのトンネリングによるオーバーヘッドを回避できる。

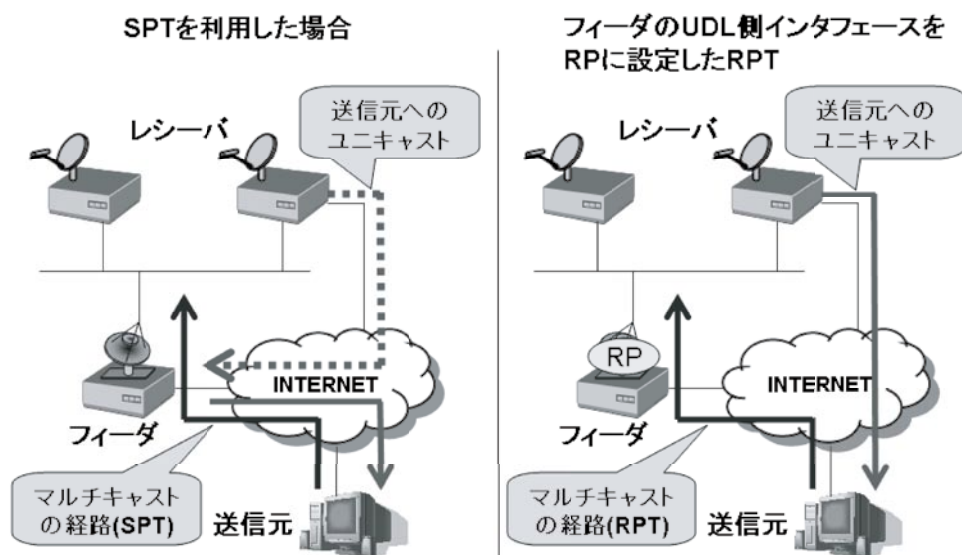


図6 UDLにおけるPIM-SMの設定

6 IPv6 の展開

AI³ はアジア地域における IPv6 の普及を目指し、ほぼ全てのネットワークが IPv4 と IPv6 のデュアルスタックで動作している。IPv4 が OSPFv2 と BGP4 で運用されているのに対し、IPv6 は OSPFv3 と BGP4+ で運用されており、ほぼ同一の経路制御が実現されている。AI³ は 1999 年に WIDE プロジェクトから NLA1 を取得し、6bone への接続を行ってきた。また、2003 年には APNIC から sTLA を取得し、AI³ パートナーおよび SOI Asia パートナーへのアドレス配布を開始した。AI³ で独自の sTLA を取得した主な理由には、1) IPv6 に関するより広範囲の運用技術と運用経験を参加組織間で修得し共有すること、2) 各参加組織が現地で独自の IPv6 ネットワークを構築するために十分なアドレス空間を確保すること、3) IPv4 から IPv6 への移行に備えて IPv4 と同様に自律的な経路制御を行えること (2004 年、AI³ は NSPIX6 に接続し、より多数の研究組織との経路交換を開始した) があげられる。IPv6 の運用は AI³ 内の IPv6 ワーキンググループを中心に展開され、実際の IPv6 ネットワーク構築と IPv6 に関する技術情報や運用技術の共有が進められている。また、新たに参加した SOI Asia パートナーは、受信サイトの構築時に IPv4 と IPv6 の同時設定が強く推奨されており、ワークショップなどの教育活動を通して IPv6 技術の普及促進が計られている。

7 被災地域へのインターネット接続環境の提供

東南アジア地域の中には、地上の通信基盤が未発達な地域が多数ある。このような地域の通信網は、帯域が狭いだけでなく、災害時の耐性面でも問題がある。自然災害で主要回線が切断されると、数ヶ月にわたって接続が復旧しないこともある。

このような被災地域への、インターネット接続環境の緊急提供に適している通信手段は、衛星通信である。SFC は、AI³ の活動を通して長年にわたり衛星通信回線を用いたインターネット接続環境の構築を行ってきた。この経験を生かして、SFC は、2005 年にスマトラ沖地震津波で壊滅的被害を受け

たインドネシア・バンダアチエの大学に対して、インターネット接続環境の緊急提供を行った。

この経験により、インターネット接続環境の緊急提供に、衛星通信回線の利用が非常に有効であることが実証できた。今後は、この経験で得たノウハウを、被災支援担当行政庁や通信会社に役立ててもらえるよう、手順書の整備や「緊急提供パッケージ」の整備を行う必要がある。

8 今後の展望

今後、アジア地域のインターネットは、地上回線整備による広帯域化が実現される地域と、引き続きインターネット接続自体が困難あるいは貧弱な地域とが混在した環境が維持されると予想される。この状況では、デジタル・デバイド解消に資する情報共有技術が強く求められ、衛星インターネットが果たすべき役割は大きい。今後は、一層多くの通信要求に対応する高度な運用技術が必要であり、広範囲への緊急通信やアジア規模のマルチキャスト網など、規模性を有効に利用した新たなサービスの実現が望まれる。SFC は、引き続き AI³ を通して、東南アジアにおけるインターネット通信基盤整備の活動を拡大していく予定である。また、東南アジアにおけるノウハウの蓄積を生かして、アフリカ地域の基盤整備にも着手する予定である。

参考文献

- [1] Suguru Yamaguchi and Jun Murai, "Asian Internet Interconnection Initiatives", In *Proc. INET'96*, June 1996.
- [2] E. Duros, W. Dabbous, H. Izumiyama, N. Fujii and Y. Zhang, "A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links", In *RFC3077*, March 2001.
- [3] Tomomitsu Baba, Hidetaka Izumiyama and Suguru Yamaguchi, "AI³ Satellite Internet Infrastructure and the Deployment in Asia", In *IEICE Transactions on Communications*, August 2001.
- [4] Shoko Mikawa, Keiko Okawa and Jun Murai, "Establishment of a lecture environment using Internet Technology over satellite communication in Asian Countries", In *Proc. SAINT 2003 Workshop*, January 2003.
- [5] Watanabe Haruhito, Izumiyama Hidetaka and Shibamoto Masakatsu, "Dynamic Bandwidth Configuration / Assignment System for Satellite Internet", In *Proc. PTC'05 Conference*, January 2005.
- [6] Achmad Husni Thamrin, Hidetaka Izumiyama and Hiroyuki Kusumoto, "PIM-SM Configuration and Scalability on Satellite Unidirectional Links", In *Proc. SAINT 2003 Workshop*, January 2003.