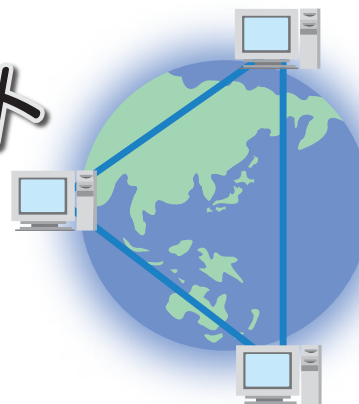


2

アジアのインターネット 基盤と衛星インターネット 技術



藤枝 俊輔
WIDE プロジェクト
sirokuma@k.u-tokyo.ac.jp

渡部 陽仁
WIDE プロジェクト
haruhito@sfc.wide.ad.jp

片岡 広太郎
WIDE プロジェクト
kotaro@sfc.wide.ad.jp

アフマド・フスニ・タムリン
WIDE プロジェクト
husni@ai3.net

アジアでは、地上回線整備によって広帯域化された地域と、引き続きインターネット接続が貧弱な地域の混在が続くと予想される。この状況において、衛星インターネットは、デジタル・デバイド解消に資する情報共有技術として大きな役割が期待されるが、地上回線と比べて狭帯域であるため、無線帯域を効率的に利用する必要がある。本稿では、AI³ネットワークの構築と変遷を事例に、衛星インターネットの最適化手法と実際の適用例を解説する。また、UDLおよびUDLRの実証実験、アジア規模の遠隔教育活動に利用されているUDL上のマルチキャスト、アジア地域へのIPv6普及促進など、衛星インターネットを利用してAI³が取り組んでいる最新の活動を報告する。

AI³プロジェクト

Asian Internet Interconnection Initiatives (AI³, ei-tripl-ai) プロジェクト¹⁾は、アジア地域における国際的な情報通信基盤の構築に向けて設立された国際研究コンソーシアムである。本プロジェクトは、アジア地域の研究グループを相互接続する実験ネットワークを展開すること、その運用を通してすべての参加グループが技術知識や運用経験を共有すること、そうした共通基盤を元にインターネット技術を共同研究開発することを目的としている。これらの活動を通して、アジア各国におけるインターネット通信基盤の整備促進や研究活動の活性化を目指している。

AI³による実験ネットワークをAI³ネットワークと呼ぶ。1995年に、AI³は専用回線の確保が困難なアジア

各地の研究機関を短期間に相互接続するため、衛星回線を用いた国際バックボーンの構築を開始した。衛星回線は、地上回線の整備状況にかかわらず利用でき、用途や実験形態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。実験開始時点では、地上回線と比べて十分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科学技術大学院大学 (NAIST) をハブ局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 Institute of Technology Bandung (ITB, Indonesia), Asian Institute of Technology (AIT, Thai), 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

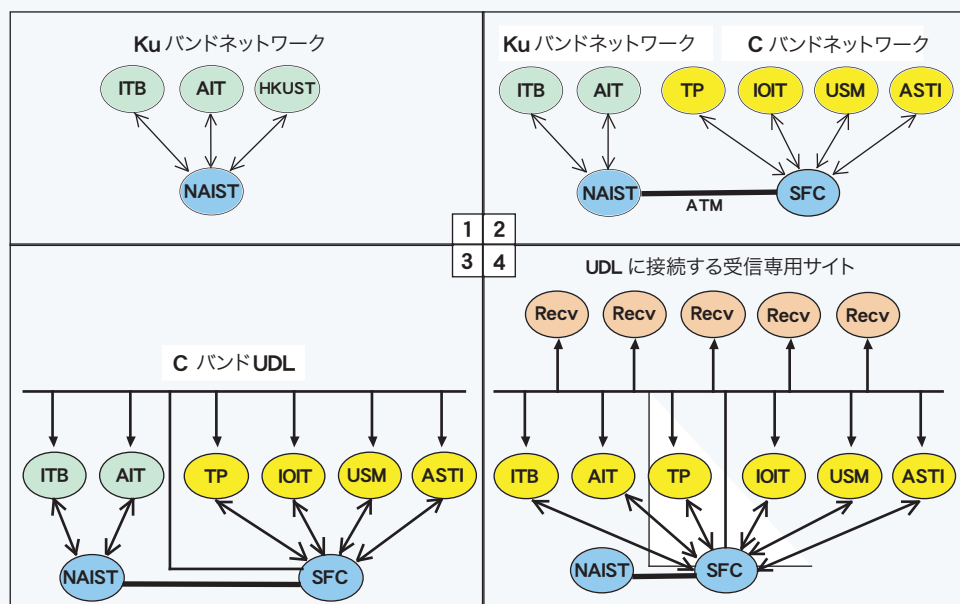


図-1 AI³ネットワークの変遷

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徐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が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回線を併用するモデルから、地上回線がまった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、インターネットにおける衛星回線への要求と利用モデルの変化を背景に、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)⁴⁾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の普及など、AI³における最新の活動を報告し今後の展望を述べる。

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つのフェーズに分かれる。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、すべ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ある。また、AI³は“実験ネットワークの運用を通してすべ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 (Asia-Pacific Area Network, 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慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス (Shonan Fujisawa Campus, SFC) をハブ局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

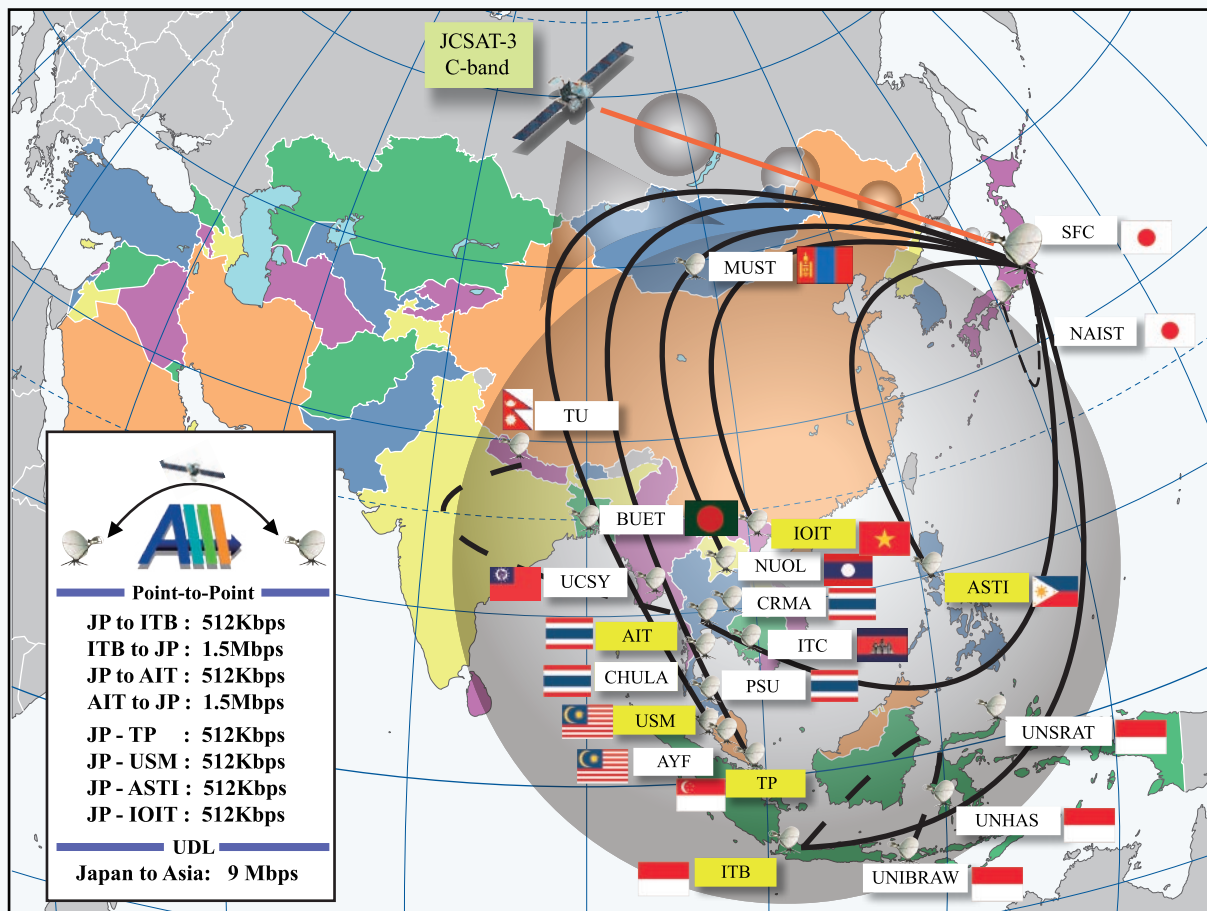


図-2 現在のAI³ネットワーク

(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パートナーがハブ局（NAISTおよび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。各パートナーでは、ハブ局と接続する既存の双方向衛星回線に加えて、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1つの理由には、AI³ネットワークをインフラストラクチャ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、実際にアジア規模の遠隔教育プロジェクト（SOI-ASIA）²⁾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。

2005年5月31日現在のAI³ネットワークを図-2に示す。ITB、AIT、TP、USM、ASTI、IOITは、双方向衛星回線とUDLの両方でAI³に接続された組織である。他の組織は受信専用で接続したSOI-ASIAパートナーである。NAISTは128kbpsの双方向衛星回線とWIDEインターネットを経由したVLANによってSFCと接続されており、UDLは利用していない。

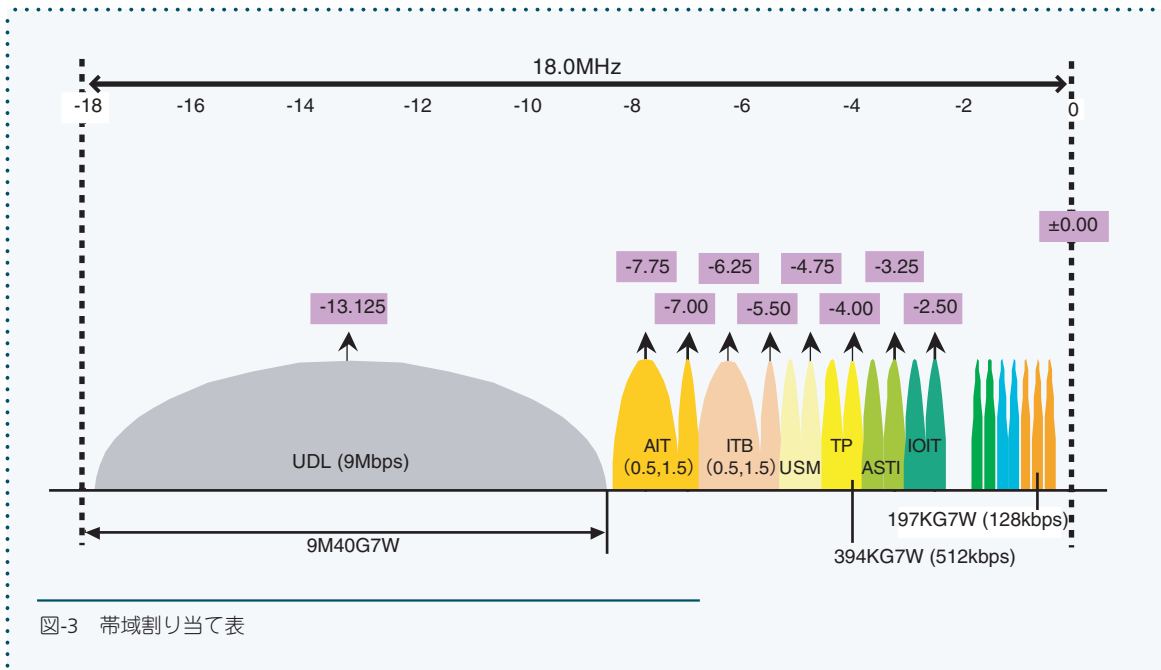


図-3 帯域割り当て表

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さまざま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) 帯域を利用用途や通信量に応じて動的に割り当てる
- (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1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、次章で述べる。(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。

UDLの利用

▶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

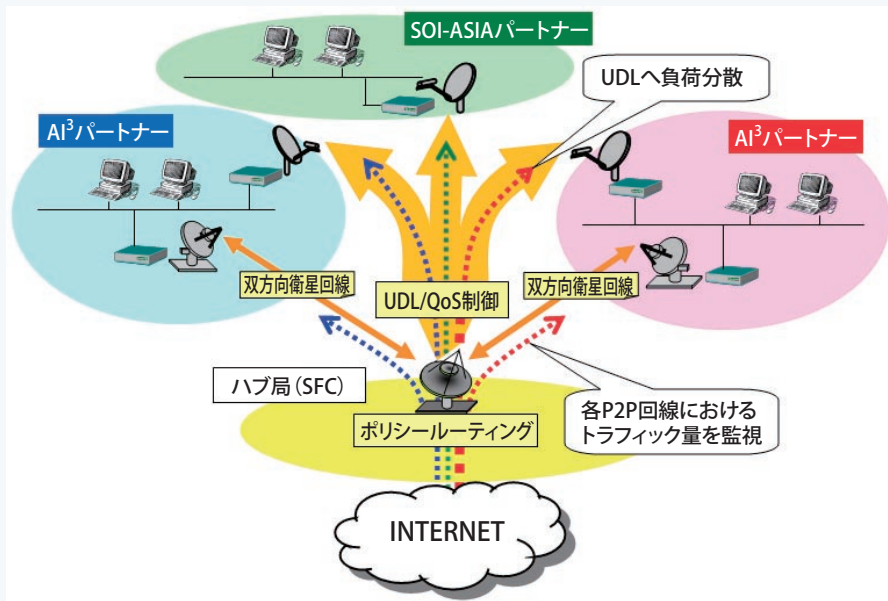


図-4 policy routing

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シー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。ポリシー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、最近ではUDLの帯域が非常に激しく消費され、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

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た対応が可能になった。また、UDLの利用効率が高いことによって、AI³の帯域全体がより効率的に利用されるようになった。

◆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

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、ポリシールーティングと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、「帯域の効率的利用」で述べた手法の(3)に相当する。

SOI-ASIAとの連携とマルチキャストへの要求

◆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⁴⁾、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ロジを示す。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。AI³パートナーおよびSOI-ASIAパートナーが利用している外部接続の帯域を表-1に示す。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への十分な告知とともに、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。

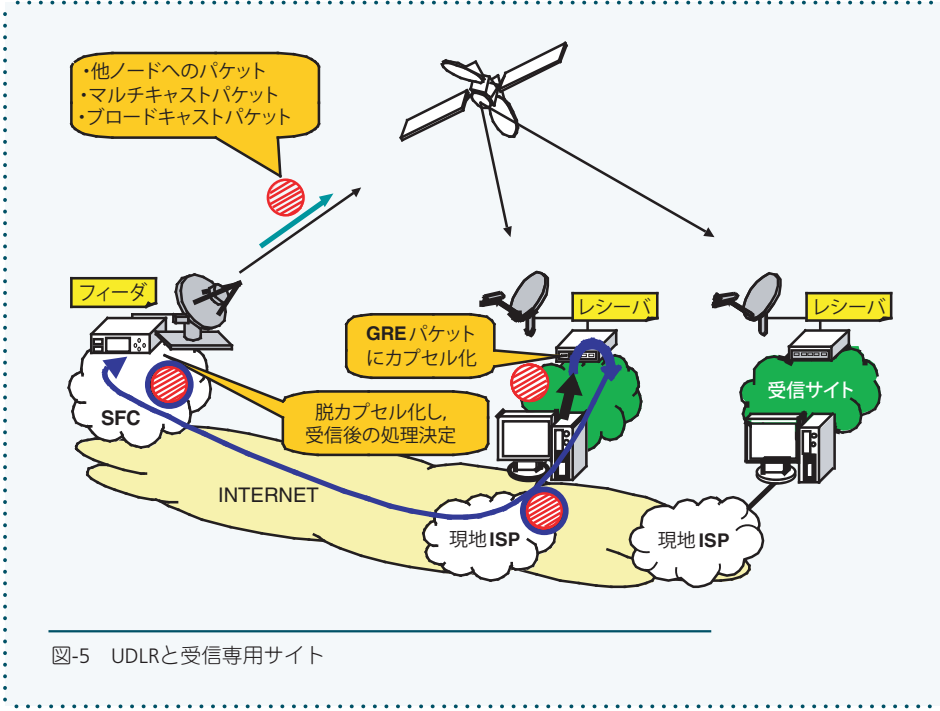


図-5 UDLRと受信専用サイト

◆ 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-SM⁶⁾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。その理由は、PIM-SMに

組織	対外線	IPv6
AI ³	-	2001:0D30::/32
SFC(日本)	-	2001:0D30:0001::/48
NAIST(日本)	wide内VLAN	2001:0D30:0002::/48
ITB(インドネシア)	1.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)	2001:0D30:0003::/48
AIT(タイ)	1.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)ほか	2001:0D30:0004::/48
TP(シンガポール)	0.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)ほか	2001:0D30:0005::/48
USM(マレーシア)	0.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)ほか	2001:0D30:0006::/48
ASTI(フィリピン)	0.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)ほか	2001:0D30:0007::/48
IOIT(ベトナム)	0.5Mbps/0.5Mbps(AI ³ 衛星)ほか	2001:0D30:0008::/48
UCSY(ミャンマー)	128kbps(現地ISP)	2001:0D30:000a::/48
CU(タイ)	24Mbps(学術)	2001:0D30:000b::/48
NUOL(ラオス)	128kbps(現地ISP)	2001:0D30:000c::/48
AYF(マレーシア)	4Mbps(現地ISP)	2001:0D30:000d::/48
UNSRAT(インドネシア)	128kbps(現地ISP)	2001:0D30:000e::/48
UNIBRAW(インドネシア)	768kbps(現地ISP)	2001:0D30:000f::/48
UNHAS(インドネシア)	256kbps(現地ISP)	2001:0D30:0010::/48
SOI-Asia Workshop	-	2001:0D30:0013::/48
PSU(タイ)	155Mbps(学術), 256kbps(現地ISP)	2001:0D30:0014::/48
CRMA(タイ)	4Mbps(現地ISP)	2001:0D30:0015::/48
MUST(モンゴル)	128kbps(現地ISP)	2001:0D30:0016::/48
ITC(カンボジア)	256kbps(現地ISP)	2001:0D30:0017::/48
BUET(バングラデシュ)	256kbps/1Mbps(現地ISP)	2001:0D30:0018::/48
TU(ネパール)	512kbps(現地ISP)	2001:0D30:0019::/48

表-1 パートナーの対外線とIPv6アドレス

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、レシーバおよ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、 unnecessary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。

IPv6の展開

AI³はアジア地域におけるIPv6の普及を目指し、ほぼすべ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技術の普及促進が図られている。表-1に、これまでにAI³パートナーおよびSOI-ASIAパートナーに配布されたIPv6アドレス空間を示す。

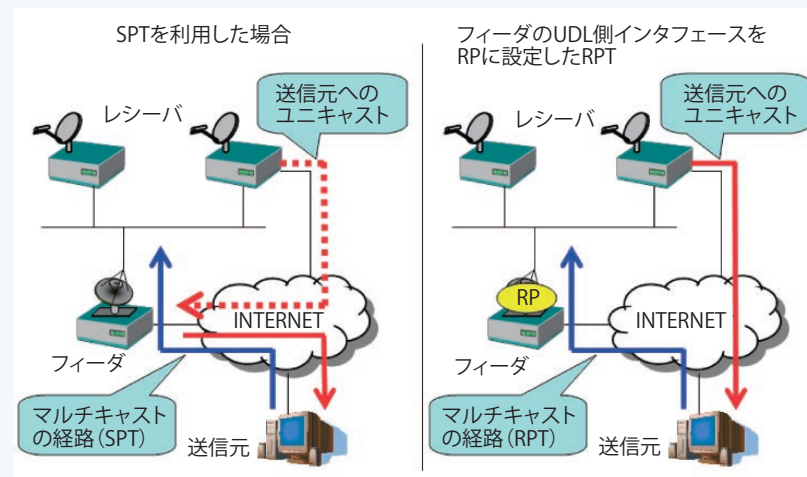


図-6 UDLにおけるPIM-SMの設定

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。AI³は、そうした衛星インターネット技術の開発とともに、アジアにおけるインターネット基盤の実践的テストベッドとして活動を拡大していく予定である。

参考文献

- 1) Yamaguchi, S. and Murai, J.: Asian Internet Interconnection Initiatives, Proc. INET'96 (June 1996).
- 2) Mikawa, S., Okawa, K. and Murai, J.: Establishment of a Lecture Environment using Internet Technology over Satellite Communication in Asian Countries, Proc. SAINT 2003 Workshop (Jan. 2003).
- 3) Baba, T., Izumiyama, H. and Yamaguchi, S.: AI³ Satellite Internet Infrastructure and the Deployment in Asia, IEICE Transactions on Communications (Aug. 2001).
- 4) Duros, E., Dabbous, W., Izumiyama, H., Fujii, N. and Zhang, Y.: A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links, RFC3077 (Mar. 2001).
- 5) Watanabe, H., Izumiyama, H. and Shibamoto, M.: Dynamic Bandwidth Configuration / Assignment System for Satellite Internet, Proc. PTC'05 Conference (Jan. 2005).
- 6) Thamrin, A. H., Izumiyama, H. and Kusumoto, H.: PIM-SM Configuration and Scalability on Satellite Unidirectional Links, Proc. SAINT 2003 Workshop (Jan. 2003).

(平成17年6月22日受付)