

第 18 部

衛星通信によるネットワーク構築実験

第 1 章

研究の背景

インターネットの発展とともに、知識や情報を共有する応用は対一型の通信を基盤とした応用と比べて著しく増加している。例えば、WWW の利用による情報の共有、映像や音声等を伝達する会議システムが挙げられる。また、インターネットの地理的に普遍的な接続に対する要求が高まっている。これらの傾向によって生じる課題は、対多型の通信媒体を有効に利用することによって解決が期待できる。

WIDE プロジェクトでは、衛星ネットワークと従来の地上網を融合し、衛星通信のもつ地理的普遍性や同報性などの特徴を用いて、インターネットの新しい課題の解決を目的とするネットワーク構築実験である WISH(WIDE Internet with Satellite Harmonization) を本年度 6 月から開始した [149]。

本研究は、「デジタル衛星通信の大学間高度共同利用研究協議会」の実験可搬局免許のもとで行われており、衛星通信回線は (株) 日本サテライトシステムズが実験、研究のためにトランスポンダを提供しているものである。

第 2 章

研究の課題

2.1 衛星通信網の動的な制御

WISH で利用する衛星通信環境では、地理的に分散された地球局を複数の周波数帯域を用いて相互に接続することが可能である。さらに、計算機側から衛星通信に用いる送受信制御装置を制御することで、動的な衛星通信網の構築が可能となる。特に、衛星通信では一対一型の通信だけでなく一対多型通信を行うようにでき、トポロジと共に通信形態も動的に制御することができる。

WISH では、衛星通信網の動的な制御環境を構築し、この環境を効率良く利用していく為に必要な技術の研究開発を行う。特に既存のインターネット環境から衛星通信の送受信制御装置を制御できる環境を構築し、動的なネットワークトポロジや通信形態の制御環境を構築する。

2.2 データリンクプロトコルに関する課題

衛星通信パケット網の利用に関する研究は以前から研究が行われている。その多くは地上網の代替としての衛星通信を捉えた研究が多く、地上網との共存環境における研究はあまり行われていない。地上網との共存を前提とした衛星通信の場合、通信のデータに関する部分だけを通信網で処理し、それ以外の制御に関するものは地上網によって処理することも可能である。WISH では、衛星通信の特徴である、地理的に普遍的な接続が可能な点や同報性を考慮して、それを活かしたデータリンクプロトコルの開発を行う。

2.3 動的なネットワークトポロジ変化への対応

動的なトポロジの変化に対して、現在の経路制御技術で対応することは可能であると考えられるが、一対一型の通信と一対多型の通信のような通信形態の動的な変化に対しては、対応することができない。また、地上網と衛星通信網を効率良く利用していく為には、上位層からの通信要求に応じた経路制御が必要である [150]。これには、例えば TOS(Type Of Service) や QOS(Quality Of Service) などを利用する。

ここでの重要な研究課題は、ネットワークトポロジを上位層からの通信要求に対して変化させると共に、新しいトポロジに対応した経路制御を行うなど、ネットワーク全体が動的に通信を処理する仕組みを構築していくことである。

2.4 アプリケーションに関する課題

静止衛星を用いた衛星通信網は地上網と比較すると、伝送遅延は約 500ms と大きいがほぼ一定ではらつきがない。この網の特性の違いがもたらすアプリケーションやユーザへの影響を考慮し、衛星通信における既存アプリケーションの評価や新たなアプリケーションの提案を行う。また、衛星通信の同報性、動的なネットワークトポロジの構成などについても考慮する。

第 3 章

実験環境

WISH の衛星ネットワークの構成は、(株)日本サテライトシステムズの JCSAT-1 号衛星を利用する送受信地球局が図 3.1 に示すように 6 地点、7 局 (奈良は 2 局) で、7 つの周波数帯域を使用している。各地球局は衛星網を形成するだけでなく、各所で WIDE インターネットと接続されている。

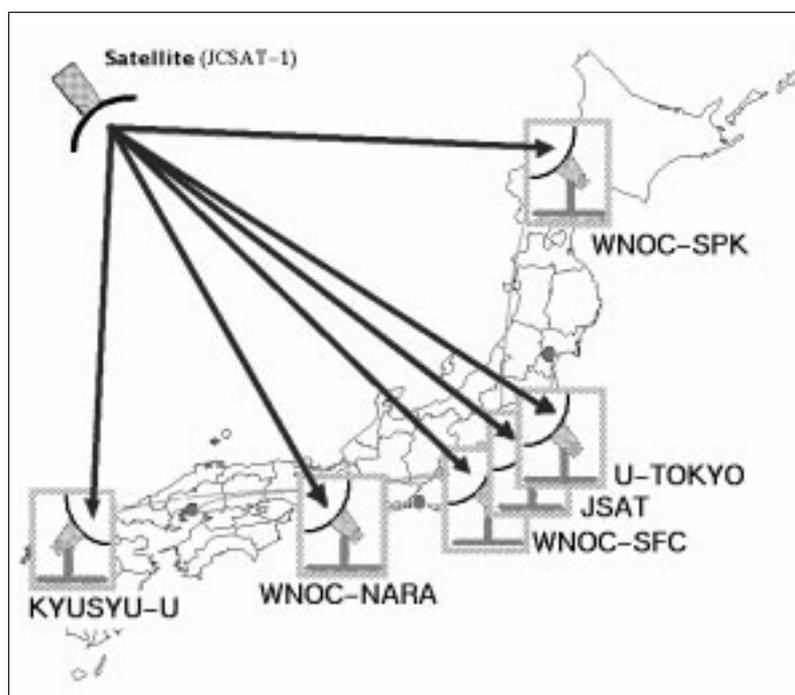


図 3.1: WISH ネットワーク

地球局設備としては超小型地球局設備を用い、 $1.8m\phi$ のアンテナ、屋外装置 (ODU: Out-Door Unit)、屋内装置 (IDU: In-Door Unit) から構成され、最大 2048kbps での通信が可能である。

通信データは IDU の RS-449/422 を用いて入出力するので、本年度は Sun ワークステーション、Sun HSI ボード、Sunlink/IR を用いて WISH 衛星ネットワークを形成した。

第 4 章

成果

4.1 衛星網の基本通信性能

本節では、WISH の衛星網についての基本性能の測定とインターネットプロトコルを用いて使用する場合の特性について検討及び評価を行う [151]。

4.1.1 情報速度及び符号化率に対する誤り率

図 4.1 に各情報速度において符号化率 (FEC R) を変化させた場合のビット誤り率 (BER) を示す。横軸に E_b/N_0 、縦軸にビット誤り率を示す。

このグラフから、符号化率を变化することにより約 2.5 ~ 5dB ($BER = 10^{-6}$) の符合化利得を得ることが可能であるとわかる。情報速度を变化させた場合でも、符号化率ごとに同じような傾向を持つことがわかる。

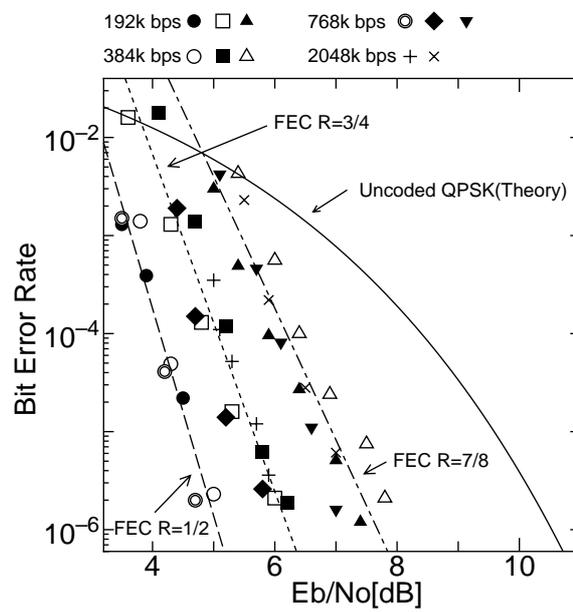
4.1.2 情報速度に対する送信バックオフ

図 4.2 に情報速度に対する送信バックオフを示す。横軸に 2W 出力時を 0dB とした送信バックオフ、縦軸に E_b/N_0 を示す。

点で示したデータは実測値で、送信電力を帯域ごとに決められたバックオフに設定して測定したものである。バックオフ量は伝送帯域に対して決められるため、どの情報速度もほぼ同じ E_b/N_0 の値となっている。 E_b/N_0 が 6.2dB のところに引いてある点線は、FEC R=3/4 使用時に $BER = 10^{-6}$ を満たす境界である。また、衛星の入出力特性がリニアであると仮定した場合の送信バックオフに対する E_b/N_0 の推定値を点線で示した。これにより例えば、2048kbps を 0dB(2W) で送信している場合は 10^{-6} を満たすのに約 10dB の送信マージンが存在することがわかる。

4.1.3 情報速度に対する受信マージン

図 4.3 に情報速度に対する受信マージンの量の変化を示す。縦軸は衛星からの電力が一定とした場合にどれだけの受信マージンがアンテナ径及び情報速度に対して存在するかを示

図 4.1: Bit Error Rate v.s. E_b/N_0

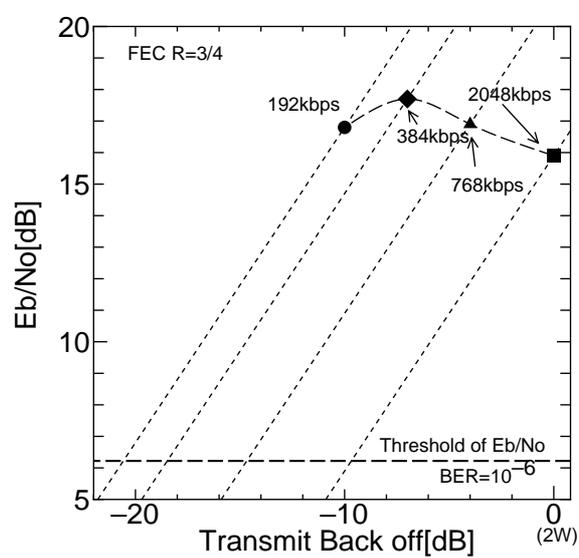


図 4.2: Transmit Back off v.s. E_b/N_0

している。

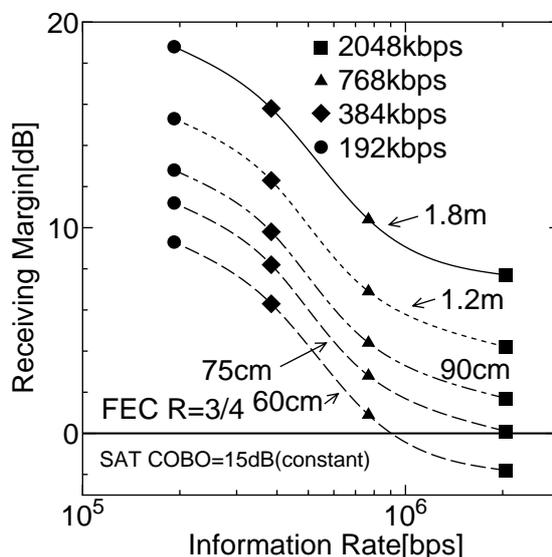


図 4.3: Receiving Margin v.s. Information Rate

このグラフは、 $1.8m\phi$ の場合について実際に測定を行い、その他のアンテナ径については $1.8m\phi$ のデータからアンテナ径の比の 2 乗を dB 換算することにより示した。小口径アンテナの性能を見ると、 $60cm\phi$ のアンテナでは 2048kbps の受信は満たせない。しかし、 $75cm\phi$ アンテナの送信利得及び $1.8m\phi$ アンテナでの 2048kbps 送信に対する受信マージンから逆算すると 64kbps ~ 数百 kbps のデータ速度の送信が可能であると考えられる。

4.1.4 まとめ

これらの結果より、衛星折り返し回線において送信電力 2W、 $1.8m\phi$ のアンテナを用いた場合、2048kbps の情報速度での通信において、降雨等の影響を考慮しても十分な回線品質が得られることがわかる。

4.2 衛星網上で TCP/IP の性能

TCP/IP プロトコルスタックを衛星ネットワーク上で使用した場合の通信性能の測定を以下のような実験環境で行った [152]。

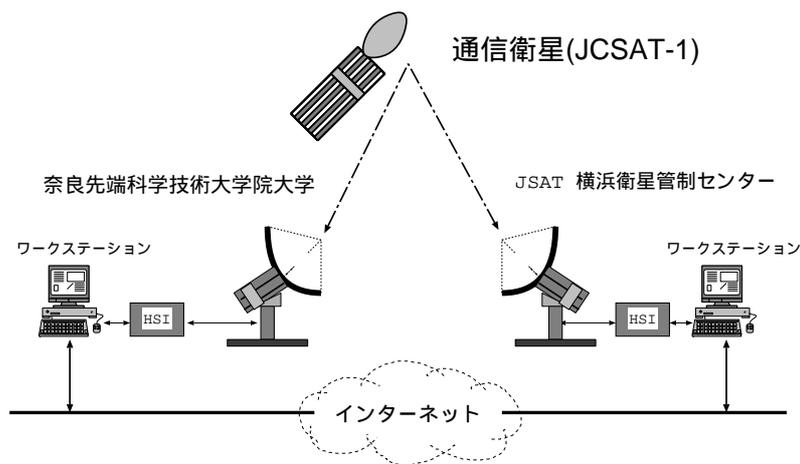


図 4.4: ネットワーク概念図

図 4.4が今回使用した衛星ネットワークの概念図である。本実験は、(株)日本サテライトシステムズの横浜衛星管制センターと奈良先端科学技術大学院大学にそれぞれ設置された地球局を使用して行った。双方の地球局は、高速シリアルポートによりワークステーションに接続されており、データリンクレベルで 2048kbps のデータ転送速度が実現されていることが前節の実験により確認されている。

図 4.5は、TCP を用いて衛星回線上でデータ転送を行った結果を示している。縦軸は転送時間、横軸は転送したファイルの大きさを示しており、段階的に転送速度が変化しているのが、衛星回線を用いた場合であり、直線的に変化しているのがシリアルケーブルを用いてループバックテストを行った結果である。高速シリアルポートによる性能測定では、95%の回線利用率が確認され、ファイル転送を行った場合安定した高速な転送が行われていることがわかる。

この実験結果から、衛星ネットワーク上で TCP を使用した場合の転送能力は、データリンクレベルの能力を大きく下回ることがわかった。

データリンクレベルでの転送帯域は 2048kbps であるが、ファイル転送における実行帯域は、4kbps ~ 400kbps である。衛星通信リンクは 500ms のラウンドトリップタイムを持つために、TCP セッションの確立から実際にデータ転送が開始されるまでに 500ms 以上の時間が費やされる。ファイルサイズが 20kbytes 以下の時点でのデータ転送時間が 1sec 程度で安定しているのは、セッションの確立時からデータ転送までの 500ms と、データを転送を終了し送達確認が送られるまでの 500ms が全体の転送時間のほとんどを占めているからである。

ファイルサイズが 約 25kbytes 増加するごとに転送時間が急激に変化している原因は、データ転送に使用したアプリケーション (ftp) が、24576bytes のウィンドウサイズでデータ転送を行うことに起因している。TCP ではウィンドウサイズ以上のデータを転送する場

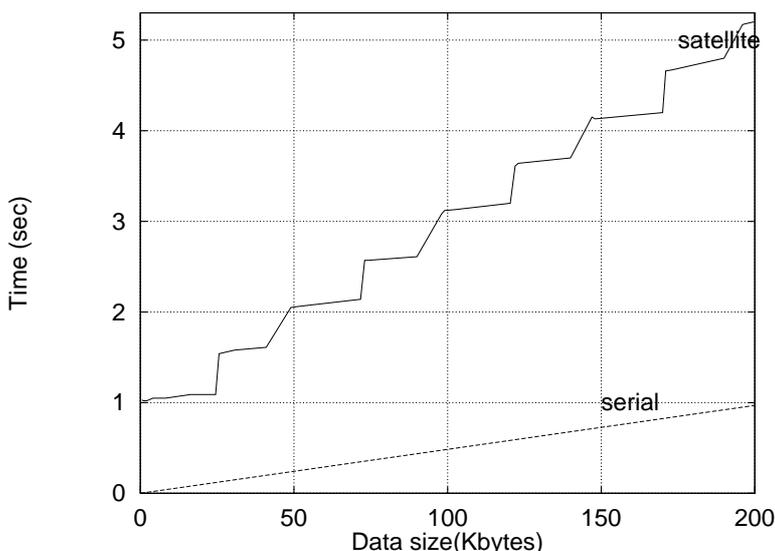


図 4.5: TCP(ftp) によるデータ転送

合、受信側のウィンドウ更新要求が送られなければならない。このため、1 ラウンドトリップの間に1 ウィンドウサイズ以上のデータの転送はできない。また、この実験では衛星リンクの両端で通信を行ったため、転送の開始時から大きなウィンドウサイズで通信を行うことができたが、通信する両者の間に中継者がいる場合は、slow-start アルゴリズムが適応される場合がある。このような場合は、さらに通信性能の低下が予想される。

図 4.6 にウィンドウサイズを変更したときの、100kbytes のデータ転送時間の遷移を示す。縦軸は転送時間を示し、横軸はウィンドウサイズの大きさを示している。グラフから、ウィンドウサイズを大きくすることにより、データ転送時間を大幅に短縮できることがわかる。

2048kbps の帯域幅を完全に利用するウィンドウサイズは、次のように求めることができる。

$$2048000 \times 0.500 \times 1/8 = 128000 \text{ Bytes}$$

しかしながら、従来の TCP では、64kbyte 以上のウィンドウサイズを指定することができないため、最大で約 50% の帯域しか利用することができない。

現在、このような問題に対する解決策として、Van Jacobson による Window scale オプションなどが考案されている。今後これを実装したオペレーティングシステムを用いて実験を行う予定である。

以上のように現在の TCP の実装では送達確認を行うために、遅延の大きな衛星回線上では帯域を十分に利用できないことが確認された。

しかし、送達確認を行わない UDP で通信を行う場合は、パケットロスのほとんどない効率のよい通信を行うことができることから、映像や音声情報のブロードキャストなどに

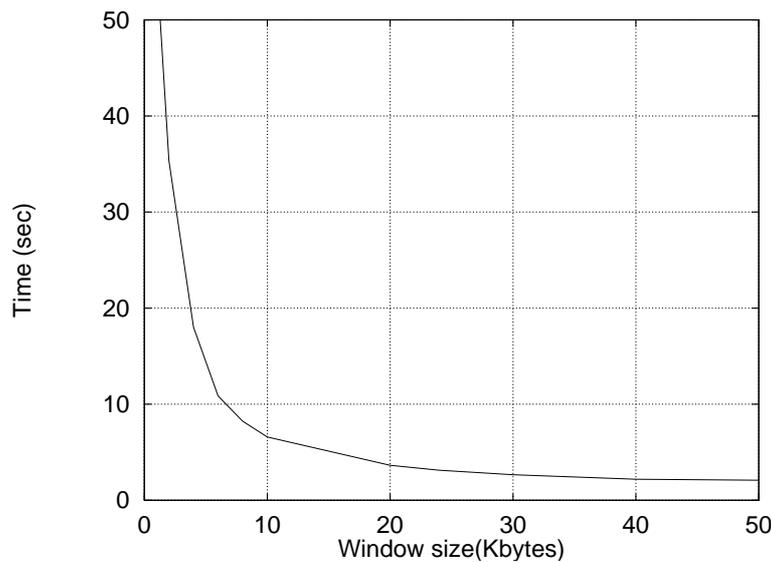


図 4.6: ウインドウサイズによるデータ転送時間の遷移

対して、衛星回線は優れた性能を示すことができる。

今後は、遅延の大きい回線上での TCP アルゴリズムの検討や、ブロードキャスト型のアプリケーションの評価実験などを行っていく予定である。

4.3 地上・衛星回線統合通信システムにおける衛星回線バイパス効果

衛星回線利用法の 1 つに、飽和状態にある地上ネットワーク上のトラフィックを衛星回線によって迂回させることによって地上ネットワークの性能劣化を抑制することが挙げられる。

本節では、実際に TOS フィールドを用いた衛星回線への迂回のシミュレーションを行い、その改善効果を報告する。

4.3.1 バイパス効果の検証

地上トラフィックの衛星回線への迂回によるバイパス効果の程度を測定するため、以下のように定式化する。

[目標]

- 衛星回線の導入により地上回線の RTT の劣化量を調べる。

[問題の定式化]

- 与えられる条件
 - 衛星ルータアルゴリズム
 - 通常ルータアルゴリズム
 - 接続要求基準値
- 入力パラメータ
 - ネットワークトポロジ
 - 各ノード間の伝送遅延時間、ノード間の回線容量
 - 各始点ノード終点ノード間のトラヒックタイプ
- 出力結果
 - RTT
 - スループット

1. キュー管理

パケットは 1100 オクテットの固定長パケットとする。各ルータはインターフェース毎に出力キューを 1 個持ち、その大きさはパケット 50 個分で、キュー管理は FCFS とし、輻輳時はパケットを消失するものとする。

2. ネットワークモデル

図 4.7 のモデルを用い、回線速度は表 2 のように、衛星回線、地上回線共に 2048kbps とし、1 ホップ当たりの伝送遅延は、衛星回線で 250ms、地上回線で 6ms とする。

表 4.1: ネットワークパラメータ

ネットワーク	伝送レート	伝送遅延
衛星回線	2048Kbps	250ms
バックボーン	2048Kbps	6ms

3. トラヒック

図 4.7 のネットワークモデルに対し、始点ノード 1、終点ノード 5 間に TCP トラヒックを 5 秒おきに 6 本まで加え、さらに、平均伝送速度 256kbps の背景トラヒックを 5 秒おきに 6 本まで加える。これらのトラヒックは、TOS フィールドを設定していない通常トラヒックと TOS フィールドの D ビットにより地上経由を要求している最小遅延要求トラヒックがそれぞれ半数ずつ含まれている。

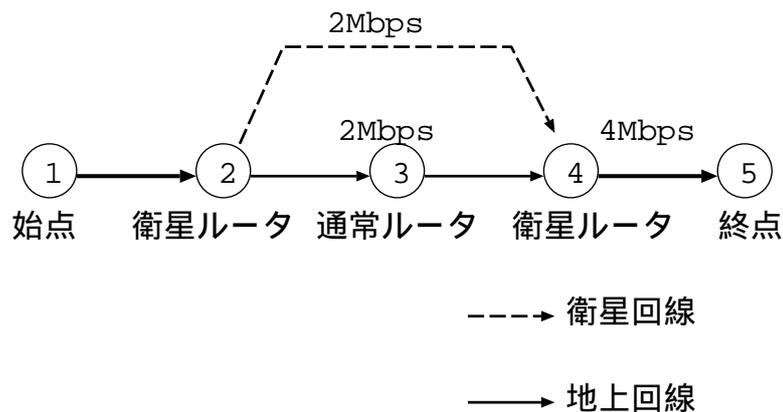


図 4.7: バイパス効果評価ネットワークモデル

4. 衛星ルータの動作

衛星ルータは、地上回線を流れているトラフィックを観測しており、トラフィック量が地上回線の伝送容量の 70% を越えた場合、TOS に従って通常トラフィックを衛星回線に迂回させ、最小遅延時間要求トラフィックのみを地上経路にて配送する。

4.3.2 シミュレーション結果

衛星回線への迂回を行わなかった場合の TCP トラフィックの RTT と、閾値 70% で衛星回線への迂回を行った場合の地上経由 TCP トラフィックの RTT を比較した結果を図 4.8 に示した。衛星回線への迂回を行わなかった場合、RTT が約 2.8ms あたりに集中しているのに対し、衛星へ迂回した場合の RTT は、0.8ms 周辺に集中した傾向となっている。また、迂回なしの場合に輻輳によって TCP トラフィックが配送されていない時でも、迂回ありの場合は RTT が観測されていることから輻輳状態からの回復も速やかであることがわかる。

図 4.9、に衛星回線占有率及び地上回線占有率の変化を示した。地上回線は、ほぼ占有率 1 で遷移しているのに対し、衛星回線では、0.4~1 の間を変動していることがわかる。

図 4.10 に送出されたパケットのシーケンス番号の変化を示した。衛星回線によるバイパスを行った場合の方がシーケンス番号で約 2.8 倍のパケットを送出できたことがわかる。

4.3.3 まとめ

本稿では、飽和状態に近い地上回線に対する衛星回線へのトラフィックの迂回は、TCP トラフィックに対して実行伝送速度で約 2.8 倍、RTT でも約 2.8 倍の改善効果があることを確認した。今後、ユニキャスト型トラフィックだけでなく、マルチキャスト型についても確認する必要がある。

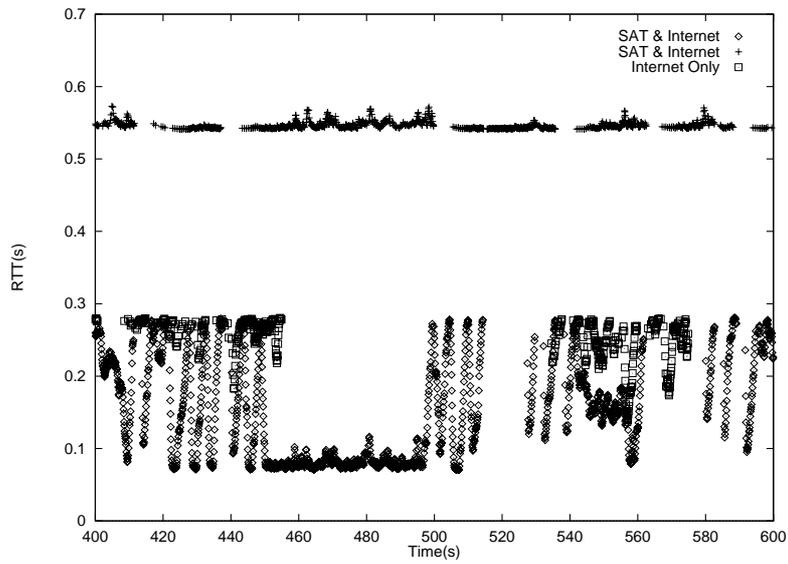


図 4.8: RTT のバイパス効果 (閾値 70%)

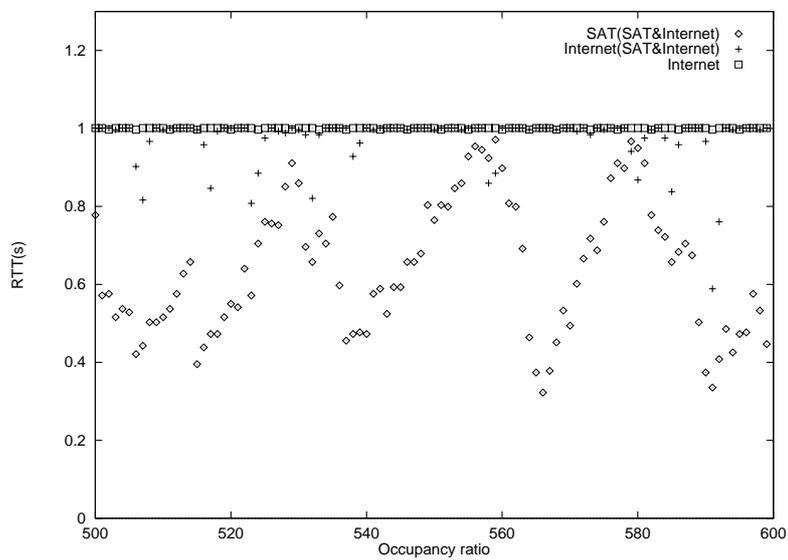


図 4.9: 回線占有率 (閾値 70%)

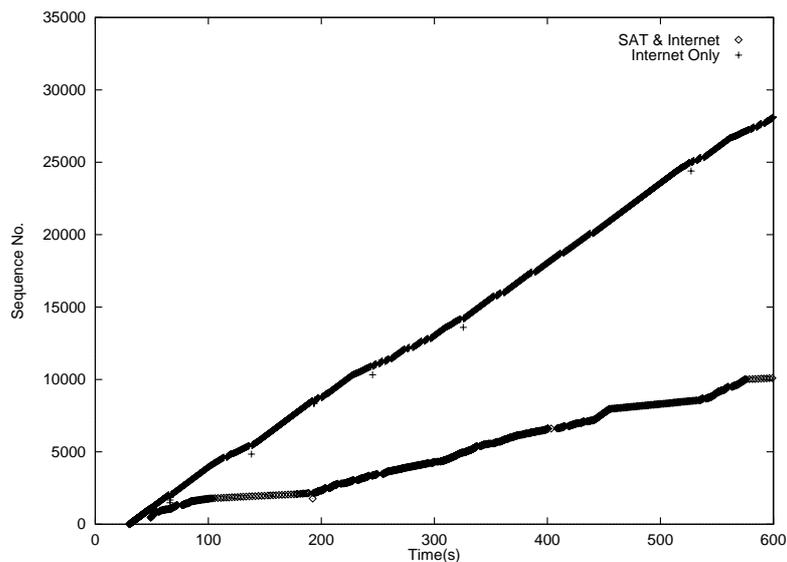


図 4.10: パケットの送出状況 (閾値 70%)

4.4 移動運用実験—日本マイクログラビティ応用学会中継—

WISH で用いる地球局は実験可搬局としての免許を受けているため、日本全国にて設置することができる。従って、インターネットに接続されていない地域や施設へ臨時に地球局を設置することでインターネットの接続を可能とする。これまでも何度かそのような試みを行ってきた。

音声や映像などの情報を発信するための生活基盤の構築が、様々な分野で重要性を増してきている。研究成果を世界中に知らせたいと考えている研究者も少なくない。このような背景のもと、WIDE プロジェクトでは微小重力状態の物質を扱う分野の研究者との共同で、地下無重力実験センター (JAMIC) での落下実験の中継を試みた。移動運用実験の 1 例として、この中継実験について報告する。

4.4.1 概要

1994 年 11 月 14～15 日に開催された「日本マイクログラビティ応用学会 第 10 回学術講演会 (JASMAC-10)」には、この分野の多くの研究者が参加する。そこで、講演会場である大阪府池田市の通商産業省工業技術院大阪工業技術研究所 (大工研) へ、北海道の JAMIC から微小重力実験の映像を送ることになった。また、JASMAC-10 では宇宙飛行士毛利 衛氏の招待講演と表彰も行われるため、その模様を WIDE インターネットへ中継し、東京大学や宇宙科学研究所の同分野の研究者からメッセージを頂くことも計画した。

この中継においては、映像や音声等の情報量の多いデータをリアルタイムで伝送するこ

とが望まれ、広帯域の伝送路である衛星回線を用いることが提案された。このため、中継実験は WISH によって、大工研と JAMIC の双方へ 1.8mφ のパラボラアンテナを持つ衛星通信地球局を設置し、実施される運びとなった。

4.4.2 トポロジと経路制御

大工研、JAMIC は共にインターネットに接続されていないため双方の地球局間の通信だけではインターネットに接続できない。そこで、図 4.11 と図 4.12 に示すトポロジを用意し、それぞれをトポロジ A、トポロジ B とした。

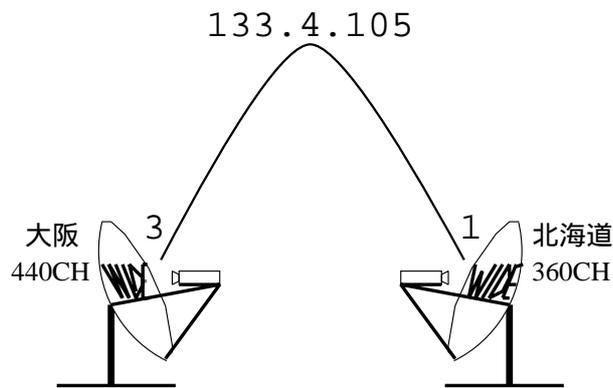


図 4.11: JASMAC-10 中継時トポロジー A

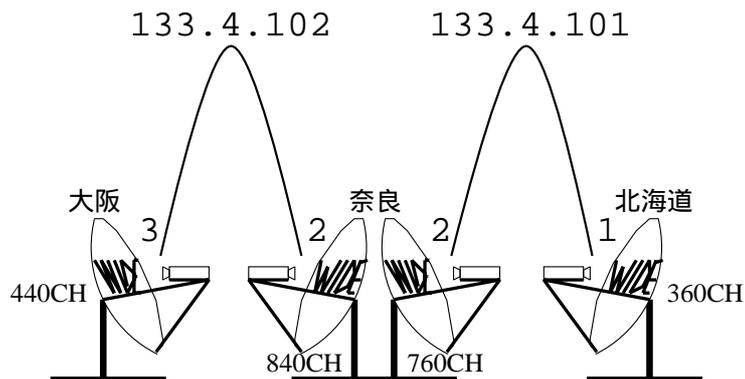


図 4.12: JASMAC-10 中継時トポロジー B

まずトポロジ B により、地球局 2 局を持つ奈良を間に介することができるので北海道、大阪の両地点は WIDE インターネットへ接続できる。経路情報は OSPF を用いて奈良が

ら WIDE インターネットへ伝搬させることで対応した。しかし、この時の北海道-大阪間は通信中に 2 度衛星を経由しなければならない。衛星通信では送信された電波が衛星を通じて受信されるまでの間に約 250ms の遅延が生じるために、この間の通信遅延は片道で約 500ms となる。4.2 章で述べた理由から、TCP を用いた通信の場合にこの遅延は大きな欠点となる。そこで、中継の内容や使用アプリケーションに応じてトポロジ A、B を切替えて通信を行うこととした。

ところで A、B どちらのトポロジにおいても、Sunlink/IR を用いた場合には Point-To-Point 型の接続しかできない。しかし、衛星通信の特徴の一つには同報性、すなわちマルチキャストの通信への応用が考えられる。

そこで、トポロジ A の時に、奈良などの既に地球局が設置されている各所で、北海道あるいは大阪の送信チャンネルに受信チャンネルを合わせて、マルチキャストパケットを受け取ることを試みた。

4.4.3 マルチキャストへの応用

WISH の用いる衛星通信は、チャンネルと呼ぶある幅の周波数を単位としてこれを切替えることによって行う。例えば、大阪の受信チャンネルと北海道の送信チャンネルをと同じにすると、大阪は北海道からのパケットを受け取ることができる。双方向にする場合は、逆に北海道の受信チャンネルを大阪の送信チャンネルに合わせる。

ここで、第 3 局が受信チャンネルを、大阪の送信チャンネルに合わせると、大阪から北海道へ送られたパケットを「覗き見る」ことができる。実際には、第 3 局は北海道の IP アドレスを使用しなければ、IP パケットを受信できない。なぜなら、パケットの宛先は北海道であり、第 3 局が北海道のアドレスを持っていないければ、単にそのパケットを転送しようとするからである。

トポロジ A の時に、中継実験とは無関係である SFC で実際にこの設定を行った結果、北海道ないしは大阪からのパケットを一時的に「覗き見る」ことができた。同様の設定を奈良についても行った。奈良では 2 局のアンテナが設置されているため、北海道、大阪のそれぞれの送信を同時に「覗き見る」ことを行おうとしたが、どちらの送信も「覗き見る」ことは出来なかった。Point-to-Point ネットワークでは、インターフェイスの設定時に、自分側の IP アドレスと相手側の IP アドレスの 2 つのパラメータが必要である。1 つの計算機において、1 つのインターフェイスに北海道、もう 1 つのインターフェイスに大阪とアドレスを振る。このとき、それぞれのインターフェイスの相手側は、大阪と北海道になり、相手があたかも自分であるという矛盾が生じる。このためにパケットをきちんと扱えなくなる。

奈良で覗き見不成功に終わった本質的な問題は、受信者が複数いるのに 1 対 1 通信用の IP アドレスを使ったからである。本質的な解決には、衛星ネットワークにおいてマルチキャストに対応する機構を用意する必要がある。

第 5 章

今後の計画

5.1 実験基盤

WISH のネットワークは現在 7 つの地球局から構成されているが、本年中にも同様の地球局を増設する予定である。

また、 $0.75m\phi$ アンテナと $5.5m\phi$ アンテナを用いた地球局も設置し、3 種のアンテナそれぞれの組合せにおける通信性能等について比較検討を行う。

5.2 現在の研究テーマ

5.2.1 マルチキャスト通信の研究

これまで WISH で衛星網を用いる際には、SUN ワークステーションと SBUS 高速同期シリアルインターフェースを用いて、Sunlink/IR の ptp デバイスを利用してきた。このため衛星網のリンクは 1 対 1 型の形態に制限され、衛星通信の大きな特徴である同報性を生かすことが出来なかった。

このようなことから、1 対多型の通信をサポートすることを目的として、ptp デバイスに代わるマルチキャスト型のデバイスドライバの開発を進めている。現在、SUNOS4.1.3 用のバージョンのデバックと通信性能の測定を行っている。この他にも BSD/OS の動作する AT 互換機と RISCOS の高速シリアルボードの組み合わせで動作するバージョンも開発する予定である。

また、実用的なテーマとして、このドライバを利用する同報型のアプリケーションの設計も進めている。現在のところ、複数のホストに同時にファイルを転送するプログラムや、NetNews を配送するプログラムなどの開発を予定している。

5.2.2 衛星通信制御システムの構築

衛星通信の送受信の制御は IDU の操作によって行われる。現状においては、この操作は各地球局のそれぞれのオペレータの手で行う。この方法では、送受信の停止、再開、送受信

周波数や通信速度の変更といったネットワークトポロジの構成に必要な作業が瀕雑に必要な場合に速やかに操作を行うことが難しく、またオペレータの操作ミスも起こり得る。さらに、複数の地球局が存在して同時に複数の衛星リンクが確立している場合には全ての衛星リンクの状態を把握し管理することは一層困難となる。

そこでこの問題の解決を計るため各局の IDU の制御をそれぞれ計算機側から行い、さらに各計算機が地上網を通じて協調しながら衛星ネットワークの接続状態を一元的に制御、管理出来るシステムの構築を進めている。また、これにより限られた周波数を効率的に利用し、複数の地球局での共有が可能となる。

既に計算機から IDU を制御するためのライブラリの作成を終え、制御システムの設計を行っている段階である。

