

CATV 回線を利用した広域 VoIP ネットワークの構築

Constructing CATV Wide Area VoIP Network

高尾 哲康

TAKAO Tetsuyasu

1. はじめに

ここ数年のインターネットの爆発的な普及とともに、データ通信基盤としての IP ネットワークの整備が進んだことにより、IP ネットワーク上で音声伝送を実現する技術として、VoIP (Voice over IP) が注目されている。音声伝送において、データをパケット化することにより、IP ネットワークなど既存のネットワーク技術の延長で音声通話が可能となり、電子交換機が不要となるなど、大幅なコスト削減が可能となった。その反面、パケット通信では、従来の公衆交換電話網 (PSTN: Public Switched Telephone Network) が回線交換によって実現しているレベルの品質と信頼性を実現するにはまだ技術的な課題が残されている。現在、VoIP による IP 電話技術は通信技術の中で最も著しい進歩を見せている技術のひとつとなっている。もともとはパソコンにカメラとマイクを取り付け、LAN 経由でリアルタイムに画像や音声をやり取りする「ネットワークテレビ会議」や、1995 年にリリースされた、VocalTec 社の「Internet Phone」をさきがけとし、Net2Phone, WebPhone など、インターネット経由で高信頼性は望めないが安価な長距離電話を実現するために開発された。最近になり、OS のユーザインタフェースがこなれてきたことにより、NetMeeting、GnomeMeeting や Messenger などのソフトの利用が広まりつつある。これらはパソコンから相手のパソコンか一般加入電話への通話であり、一般加入電話からパソコンへの通話ではできなかった。

その後、VoIP ゲートウェイ装置などが開発され、一般加入電話どうしの通話でもインターネット経由を選択できるサービスが提供されるようになった。最近では、通信事業者が基幹網を IP 網化し、公衆電話網上の呼処理を行なう SS7 共通線信号網と接続することにより、電子交換機を使わなくても既存の一般加入電話と同等レベルの利便性や操作性を提供する技術が実現しつつある。さらに、IP 電話の市場規模が拡大してきており⁽¹⁾、今後数年間に急速に普及し、需要が伸びていくと予想されている。

IP 電話 (IP Phone) の要素技術には、アナログ音声をデジタル化する音声符号化技術、デジタル化した音声データを IP パケット化する技術がある。音声圧縮符号化方式 (CODEC: Coder/Decoder) には、G.711 PCM、G.723.1、G.729A などが標準化されている。音声データを IP パケット化する技術には、基本的に UDP パケットを利用することで実現しており、リアルタイム情報の転送のための情報を追加した RTP プロトコルが UDP の上位プロトコルとして開発されて利用されている。また、呼処理には、ITU-T (国際電気通信連合電気通信標準化部門) にて H.323 として標準化している。H.323 は呼確立までのコネクション回数が多いために重いプロトコルである

ということで、現在では改良されてバージョン 3 となっている。また民間主体の IETF(Internet Engineering Task Force)で標準化された SIP(Session Initiation Protocol)⁽²⁾も軽いプロトコルのために Messenger で使われるなど急速に広がりつつある。これらはマルチメディア指向のプロトコルであるが、音声主体のプロトコルには、MGCP、Megaco/H.248、NOTASIP など⁽²⁾がある。

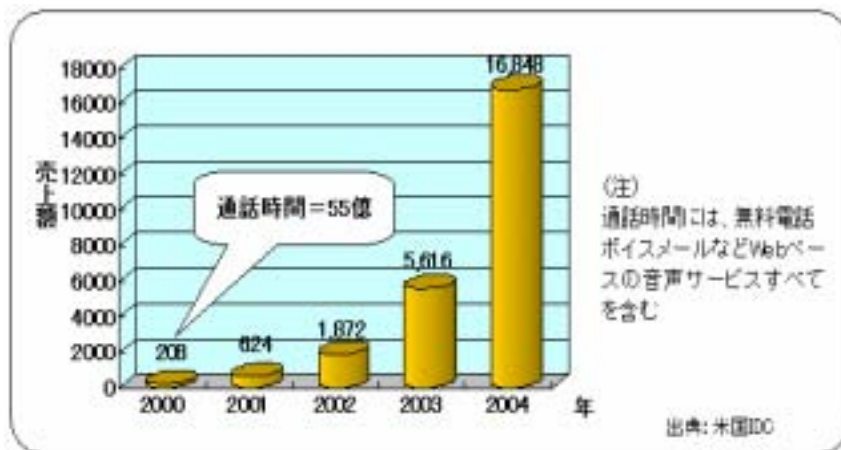


図 1. IP 電話市場規模⁽¹⁾

IP 電話普及のための課題として番号計画がある。これまでは閉じた IP ネットワークや同一事業者が上でゲートウェイ装置やゲートキーパー装置などで IP アドレスと電話番号の対応を管理していたが、今後は複数事業者間での相互通信を行なっていく必要があるため、何らかの共通の管理方法が必要となってくる。2002 年 5 月 13 日、総務省は IP 電話に「050-xxxx-xxxx」という 11 桁の番号を割り当てる「電気通信番号規則」の改正案を公開した。これまで一般加入電話から IP 電話に着信するには、いったん VoIP ゲートウェイ装置や VoIP ゲートウェイ機能内蔵の PBX などに着信させ、その後あらかじめ登録された番号をダイヤルしなければならなかった。規則改正により、公衆電話網から IP 電話の電話番号を認識できるようになるため、操作性は格段によくなっていくであろう。

2. これまでの VoIP に関する実験

1999 年から 2000 年にかけて(株)ニューメディアの CATV 網内でインターネット電話実験を行なった。なお、この実験は通信・放送機構から平成 10 年度新規事業創出型研究開発の委託研究の一部として行なった⁽³⁾。

実験に使用した VoIP ゲートウェイ装置は、電話機を接続する FXS(Foreign eXchange Station)ポート、PBX 回線と接続する FXO(Foreign eXchange Office)ポートの双方の機能を有する、Motorola 社製 Vanguard320 であり、H.323 バージョン 1 仕様の製品であった。これを米沢市、南陽市、高畠町、川西町の各市役所・町役場、(株)ニューメディア米沢センター、山形大学工学部、米沢女子短期大学の各組織にて PBX と接続し、ダイヤルインサービスなしに相互に内線番号で通話できることを確認した。また、Microsoft 社製 NetMeeting3.01 をインストールしたパソコンの IP アドレスとそれに対応する電話番号を VoIP ゲートウェイ装置に登録することで、内線番号で相互通話できることも確認できた。さらにこれらの電話番号管理のための情報を特定の VoIP ゲー

トウェイ装置に持たせ、他のゲートウェイ装置はそれを参照することで一元管理できることも確かめられた。米国製の VoIP ゲートウェイ装置のためか、PBX の種類によっては接続面での相性の問題があったり、ネットワークトラフィックが多い場合は呼処理自体が確立できないこともあったが、当時としては主流であった G.723.1 音声コーデックで携帯電話級以上の比較的良好な音質で通話できた⁽⁴⁾。

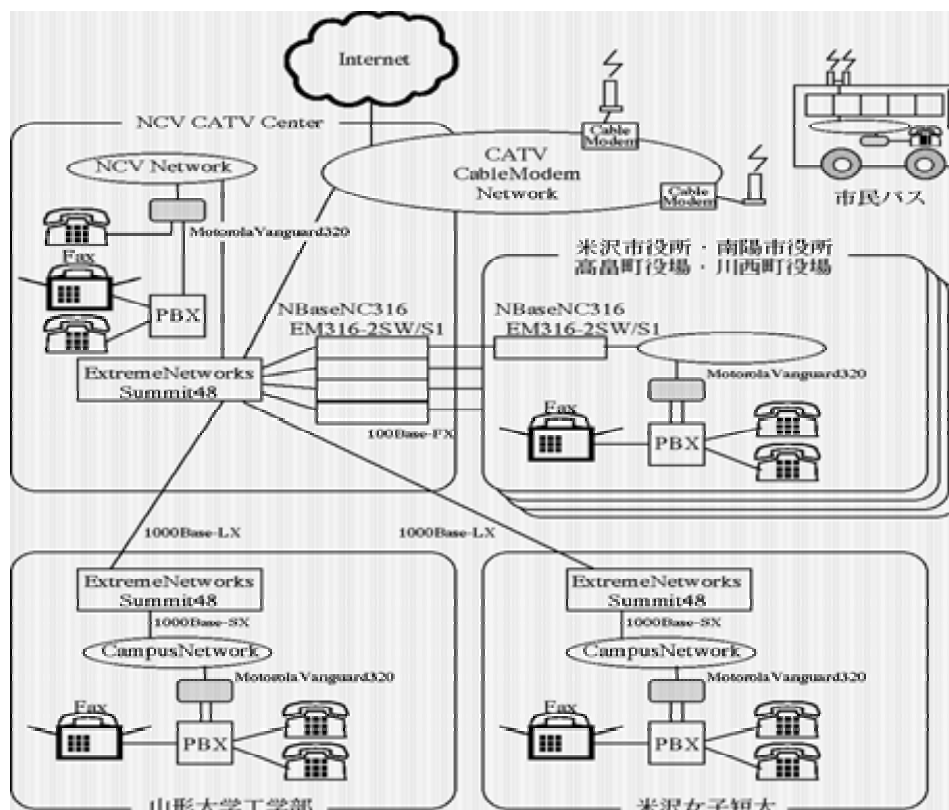


図2. CATV 網を利用した VoIP 実験ネットワーク構成図⁽⁴⁾

3. 広域 VoIP 実験の背景

IPv4 グローバルアドレスの不足により、インターネットサービス事業者はユーザの機器に対して、DHCP を利用してグローバルアドレスを一時的に割り当てるか、プライベートアドレスを割り当てている。セキュリティ対策などでプライベートアドレスを割り当てている場合には NAT(Network Address Translation)を利用してプライベートアドレスとグローバルアドレスの変換を行なうことが必要である。また、内部の LAN からの接続開始では通信できても、インターネット側から内部の LAN に接続開始することはほとんど不可能なことが一番の欠点となっている。IPv6 があまねく普及するまではこの問題を避けて通ることはできない。

本実験では、現在のプライベートアドレス割り当てなどのネットワーク構成を変更することなく複数のインターネットサービス事業者間で VoIP などの広域通信を相互発着で可能にし、さらに実用に耐え得る通信品質を実現することを目的とした。また、音声以外にも動画や各種データを伴った新たなコミュニケーション・アプリケーションを提供することで、医療、福祉、教育などの分野での活用も見込まれる⁽⁵⁾。

4. 広域 VoIP とアドレス変換

組織内 LAN においてプライベートアドレスを割り当てている場合、LAN 内であればパケットの送信元アドレスはプライベートアドレスのままですが、インターネットなど外部と通信する際には NAT などを利用してグローバルアドレスに変換する必要がある。NAT では通過する TCP パケットのヘッダ部分の IP アドレスをプライベート・グローバルに相互変換する(コネクション開始から終了まで対応関係を保持)。VoIP が使用する H.323 や SIP プロトコルでは、UDP の上位の RTP プロトコルを利用した通信となるだけでなく、呼処理制御などでパケットのデータ部にも IP アドレス情報があり、この部分も変換しないと一方向のみの通信となってしまう。そのため、単純な NAT ではうまくいかず、プロトコルの仕様に基づいたアドレス変換を行なう NAT か FireWall、あるいは特殊なプロキシが必要となる。

プライベートアドレスを割り当てている組織内の機器にインターネット側から VoIP で着信させたい場合、呼び出し先の端末の電話番号とそのプライベート IP アドレスのデータベースを持ち、かつ端末同士のコネクションを管理するゲートキーパーという装置が必要になる。ゲートキーパーはインターネットにおける DNS のように他のゲートキーパーと通信することで広域ネットワークでの呼を確立することができる。今回の実験には、(株)ニューメディアの米沢エリヤと函館エリヤを基幹インターネット経由で相互接続した。VoIP を実現するためのプロトコルとして H.323 を利用した場合の実験ネットワーク構成を示す。図において、CM はケーブルモデムを、VoIP TA は、VoIP ターミナルアダプタとそれに接続する一般固定電話機である。さらにプロトコル変換することにより、SIP との相互接続についても接続実験を行なった。

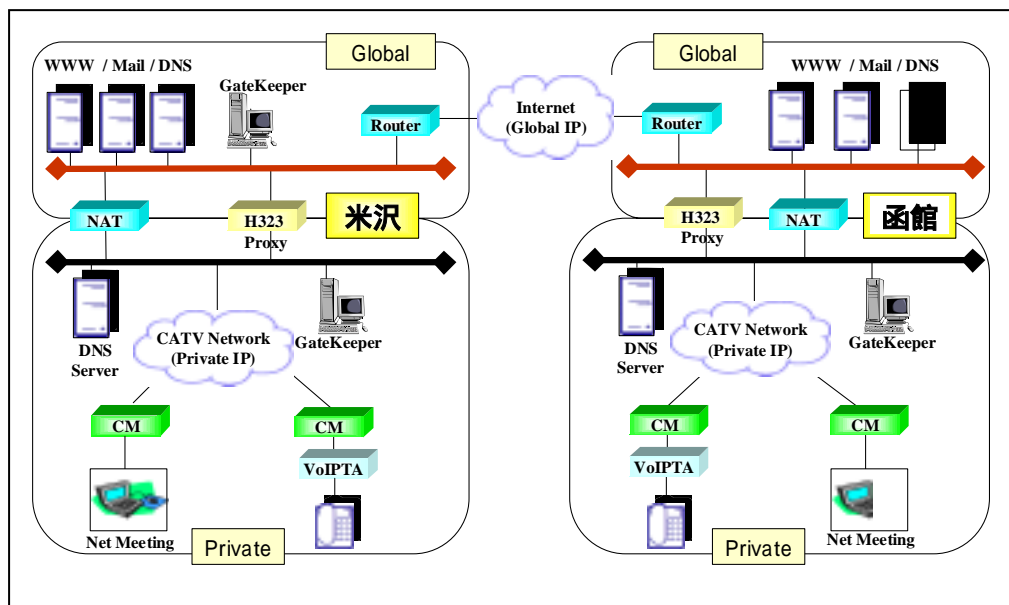


図 3. 実験ネットワーク構成⁽⁵⁾

5. 番号計画

課金処理の問題があるため、本実験では PSTN(一般公衆網)との接続を前提としていない。VoIP 用の電話番号に関してはシステム内での重複を避ければ良く、また利便性を考慮した上で、固定電話で使用している番号をそのまま使用することとした。これにより、『市外局番 = ゲートキーパーが管理する域内ゾーン』と考えることができる。本実験における番号の桁数は 10 桁となり、

そのうちの市外局番部をプレフィックスとした。同じドメイン同士であればプレフィックスを除いた番号での通話が可能となる。本実験では次の3つのケースがある。

1. NetMeeting : 常に VoIP を使用するため、VoIP 用の回線選択用番号は不要。
2. TA に一般固定電話を接続 : 回線選択用番号(#,0 等)を押してから通話先の電話番号を押す。
3. 交換機(PBX)接続 : 内線電話で VoIP 用特番を押してから通話先の電話番号を押す。

6. 音声符号化方式 (コーデック)

表 1. 音声符号化方式 (コーデック) の種類⁽⁵⁾

優先順位	CODEC	送出間隔	符号化ビットレート	実質使用帯域
1	G.729A	80ms	8Kbps	12Kbps
2	G.723.1	60ms	6.3Kbps	8.8Kbps
3	G.711 μ -law(PCM)	10ms	64Kbps	96Kbps

それぞれのコーデック(CODEC)によって音質や使用帯域が異なるため、ユーザの要求する品質や回線の状況を考慮した上で最適なものを選択する必要がある。音質と使用帯域はトレードオフ関係になるが、本実験においては予備実験結果および回線効率の点から G.729A を最優先する標準設定をそのまま使用した。

7. 域内・広域間における呼の確立

本実験では米沢側と函館側のネットワークをそれぞれ1つずつの H.323 ゾーンとして定義しており、E.164 番号の先頭4桁(固定電話の市外局番)をプレフィックスとした。それぞれのゾーンに設置されたゲートキーパーは同じゾーンに属するエンドポイントの情報(IP アドレス)をデータベースとして持つ。このデータベースで検索できない他ゾーンのエンドポイントに関してはプロキシ経由で他のゲートキーパーに問い合わせる。グローバルネットワークに設置されたゲートキーパーはエンドポイントの情報を持たず、プレフィックスに関連付けられた他のゲートキーパーやプロキシの情報のみを持つ。0138 で始まる番号への問い合わせがあれば函館ゾーンのプロキシへ、0238 で始まっていれば米沢ゾーンのプロキシへ問い合わせを転送する。転送を受けたプロキシはさらに自分のゾーンのゲートキーパーへ問い合わせる。エンドポイント情報をもつ2つのゲートキーパーA、Bはグローバルネットワークに設置されたゲートキーパーGを間に介することで相互に通信が可能となる。

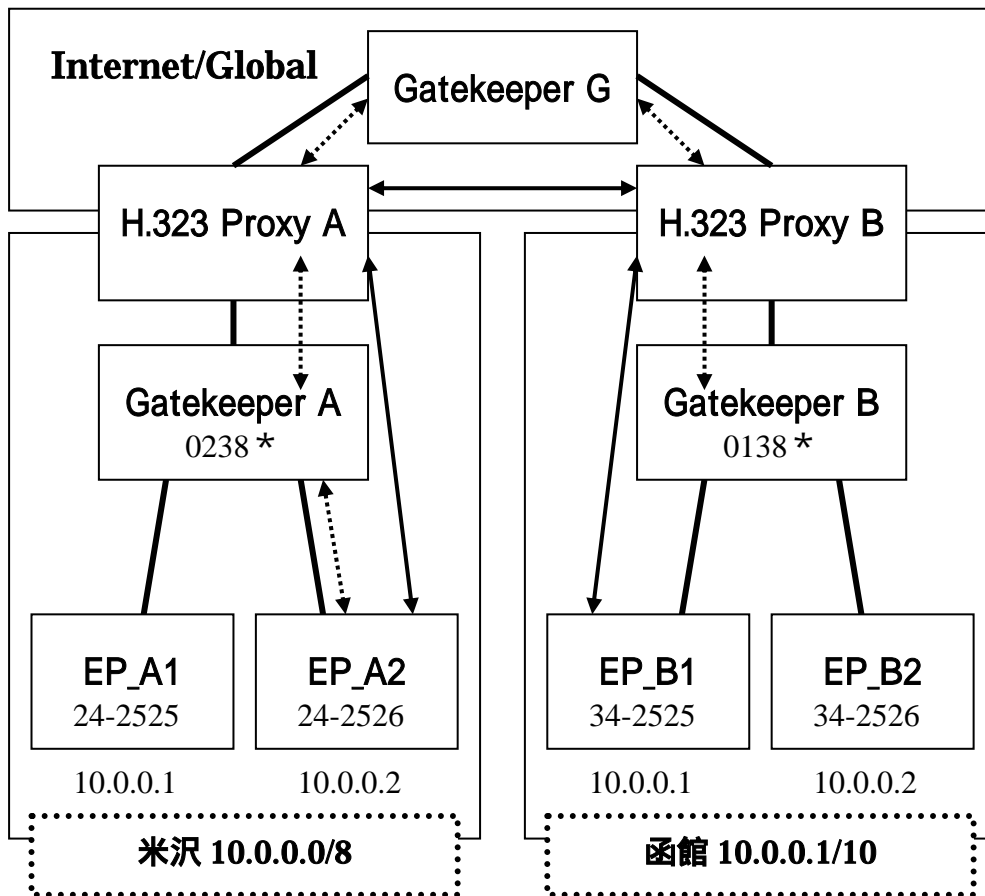


図 4. 広域 VoIP 接続図⁽⁵⁾

域内：EP_A1 が EP_A2 へ通話する場合は 24-2526 で Gatekeeper A に問い合わせる。EP_A2 の IP アドレス 10.0.0.2 が EP_A1 に通知され、EP_A1 は EP_A2 と直接通信が可能となる。

広域：EP_A2 が EP_B1 へ通話する場合は 0138-34-2525 で Gatekeeper A に問い合わせる。GatekeeperA では 0138 で始まる電話番号を解決できないので Proxy A に問い合わせを行う。Proxy A は Gatekeeper G、Proxy B を経由して 0138 をプレフィックスとするエンドポイント情報を持つ Gatekeeper B に問い合わせる（図 4 の ）。EP_A2 に通知される IP アドレスは、EP_B1 のプライベートアドレスではなく Proxy B のグローバルアドレスとなる。これにより、EP_A2 と EP_B1 が通話可能となる（図 4 の ）。

8. コーデックとパケット送出間隔による通話品質評価

コーデック (CODEC) とパケット送出間隔が通話品質にどの程度影響するかを調査した。TA では使用するコーデックに優先順位が設定されており、通話相手との能力交換の結果、1つが選択されて通信が行われる。ここでは順位づけを無効にし、特定のコーデックでのみ通信を行なう設定にして通話品質を調査した。バックボーンのトラフィックが最も多くなる時間(ピーク時回線使用率約 90%)と、平均的なトラフィック(回線使用率 50~60%)の時間に米沢・函館間で実験を行なった。表 2 に高トラフィック時間帯での結果を示す。G.729A では常に安定した品質で通話が可能であった。G.711 では送出間隔が長くなると音の途切れを感じ、音質の低下が明らかとなったが、通話の上ではほとんど気にならなかった。G.723.1 では第三者の話し声などの背景雑音がある場

合に違いが感じられ、通話者以外の音声はよく聞き取れなかった。

この試験方法においては評価者 2 名で、評価者の主観排除が難しいが、現状では高トラフィック時間帯でもコーデック、送出間隔（一部の場合をのぞく）の違いなくほぼ問題なく利用できる状態であった。

表 2. コーデックとパケット送出間隔による音声品質試験結果⁽⁵⁾

G.729a(8kbps)					
送出間隔(ms)	遅延	エコー	ノイズ	途切れ	総合品質
40	A	A	A	A	A
*80	A	A	A	A	A
100	A	A	A	A	A
120	A	A	A	A	A
G.723.1(6.3kbps)					
NetMeetingにも対応					
送出間隔(ms)	遅延	エコー	ノイズ	途切れ	総合品質
30	A	A	A	A	B
*60	A	A	A	A	B
90	A	A	A	A	B
120	A	A	A	A	B
G.711 μ-Law(PCM)(64kbps)					
送出間隔(ms)	遅延	エコー	ノイズ	途切れ	総合品質
*10	A	A	A	B	B
20	A	A	A	B	B
40	A	A	A	B	B
60	A	B	A	C	C
1【遅延、エコー、ノイズ、音の途切れの評価について】					
A... ほとんど感じない					
B... 多少感じるが通話に支障はない					
C... 通話する上で気になるレベル					
2【総合品質】					
A... 固定電話と同等					
B... 携帯電話より良い					
C... 携帯電話と同等					
D... 携帯電話以下					

9. パケット優先制御による通話品質評価

ケーブルモデムに設定した 3 Mbps の帯域幅で ftp ダウンロードを継続的に行ない、他の通信がなければ使用可能な帯域が全て ftp に割り当てられる状態にした。これが通話品質に影響を与えているか判断するため、通話品質が劣化していると感じた場合には品質評価を行ない、ダウンロードを中断した。ダウンロードを中止することで通話品質が改善された場合は通話品質の劣化がトラフィックの増加によるものであると判断し、ダウンロードを再開することで通話品質が劣化するかどうかを確認した。パケット優先制御は経路上のルータでは行わず TA のみに設定した。

G.729A と G.711 において、それぞれパケット送信間隔を変えながら音質の変化を調査した。G.711 に関してはパケット優先制御がない状態では音の途切れが目立ち、通話にストレスを感じ、実用レベルとは言いがたかった。G.729A に関しては通話に支障となるようなレベルではなかったが、ftp ダウンロードを行わない場合よりも音質がやや低下していた。パケット優先制御がある

場合はいずれのコーデック場合でもダウンロードの影響は受けず通話品質は良好であった。

表 3. パケット優先制御による通話品質評価結果⁽⁵⁾

G.711 μ -law(PCM)

パケット送信間隔	10ms	30ms	60ms
優先制御あり	良好 サーというノイズ	良好	良好
優先制御なし	携帯電話以下 細かい途切れ	携帯電話以下 細かい途切れ	携帯電話並 途切れ

G.729A

パケット送信間隔	10ms	80ms	120ms
優先制御あり	良好	良好	良好
優先制御なし	携帯電話並	良好	携帯電話並

10. 評価

広域接続

本実験の目的はプライベートアドレスを割り当てた端末が広域で VoIP サービスを利用できることであった。当初予定の H.323 での相互接続だけでなく、プロトコル変換により SIP との相互接続も行なうことができた。番号計画に関しては問題を残したものの、IP アドレスがグローバルアドレス、プライベートアドレスのいずれであっても電話番号登録のみで相互通話が可能となった。

アプリケーション利用

本実験で主に使用したアプリケーションは NetMeeting であり、動画、データ転送、チャット機能、リモートメンテナンス機能等が標準で用意されているため様々な応用が考えられる。今回はコンファレンス中継と介護目的での使用の 2 項目で実験を行なったが、最良の品質が必要とされる場合は音質や画質のチューニングが必要となり、特に高品質で映像を伝送する場合には回線品質だけでなく PC の性能や動画取りこみの方式にも注意を払う必要がある。設定値が適性でないと通信が不安定になったり切断されたりする。標準的な品質で良い場合に関しては、自由度が高く、様々な用途への応用が可能であると思われ、LCD パネル型コンピュータを利用し、オートマウスとリモート管理ツールを組み合わせることによってユーザのスキルに合わせた環境構築が可能となる。今後は教育・医療・福祉などの分野での様々な利用が考えられる。

通話品質

ユーザの接続環境や機器の違いなどによる品質の違いはあったが、ほとんどのユーザから品質に関して充分実用に耐えうるとの評価を得た。ネットワークの負荷により音質が低下してしまうような場合は、経路上のルータで音声パケットの優先制御やパケットフラグメンテーションなど何らかの処置が必要になるが、ルータが高負荷になるため注意が必要である。遅延に関しては、通話に支障を感じたユーザはほとんどいなかった。実際、遅延はシステム上、必ず発生しているのだが、通話している上では不自然な印象を受けにくいレベルであり、ほとんど気付かない。同じ部屋で TA 配下の 2 台の電話間で通話を行うと、直接聞こえる声と電話機から聞こえる声がずれ

ていることで遅延が確認できる。エコーに関してはエコーキャンセラーを有効にした状態でも 3 割以上のユーザがエコーを感じると評価したが、通話する上で気になるレベルという程ではなかった。雑音に関してはほとんどなかったと言えるが、音の途切れは多少発生している。ハブ機能を持つブロードバンドルータをケーブルモデムに接続し、TA と PC を並列に接続している場合に発生しやすかった。エコーや音の途切れは、意図的に高トラフィック状態にした実験環境で発生することが確認できている。総合品質についてはおおむね良好であったが、半数近くのユーザは固定電話との違いを感じている。その理由として、微妙に固定電話と音質が異なるという評価が多かった。電話機自体の性能もあるが、TA で使用している G.729A コーデックでは音声圧縮を行っているためである。通話品質を上げるためには G.711 のような非圧縮コーデックを使用することが有効であるが、伝送効率が悪くなる。通話品質と伝送効率のバランスを考えることが重要であり、これが安定したサービスの維持につながる。

ユーザビリティ

通話には固定電話と同じ電話番号を使用したため、TA に接続した電話機から通話を行なう上では特に大きな違いはなく問題はなかった。TA を PBX に接続した場合は、PBX によって着信時の動作が異なるため、ユーザがとまどってしまうということがあった。これに関しては操作マニュアル等で対応する必要があった。NetMeeting ではユーザごとの設定が必要となるため、ある程度スキルのあるユーザ向けではあるが、基本的にインストール時に必要な情報を設定すればテレビ電話程度の利用は容易である。また、オートマウスなどの作業自動化ソフトを使用することでユーザビリティを高めることができた。実際、LCD パネル型コンピュータを使用した介護目的での使用は、ユーザが『手を触れる必要さえない』という環境が実現した。

通話先の拡大

VoIP サービスをより有効なものとするには通話可能なエンドポイントをできるだけ増やすことが重要である。そのためには他の事業者と広域間相互接続することが有効である。プロトコルの使い分けやプロトコル間相互接続など技術的な部分はもちろんであるが、どのようなサービスとして位置付けるかということも重要になってくる。

11. 今後の方向

QoS 保証のための技術と IP 電話サービスの品質

ベストエフォート型通信である IP ネットワークでリアルタイム通信を行なう際には、遅延、パケットロス、ジッタ(遅延ゆらぎ)が発生するため、QoS(通信品質)保証のためにさまざまな技術が導入されていく。VoIP では、公衆回線網のように単一の品質とはならないため、目的、料金、利用する端末に応じた自由度を持たせることができる。そのための基準となる IP 電話サービスの品質を定めることが ITU などで検討されている。

コーデックに依存する音声品質だけでなく、IP ネットワーク特有の遅延、パケットロス、ジッタを考慮した総合音声伝送品質が検討されており、PESQ、R 値などの客観評価の指標がある。また、呼処理の接続品質、ネットワークの伝送品質などを含めて QoS クラスを定義することが検討されている。110 番や 119 番などの緊急番号対応ではそれなりのコストをかける場合も出てくる。

IP 電話番号計画と番号管理

一般加入電話から IP 電話端末へ特別なやり方をすることなく着信させる場合には E.164 番号の割り当てが必要であり、公衆電話網から IP 電話番号を認識できる必要がある。総務省では「050」案を公開している。

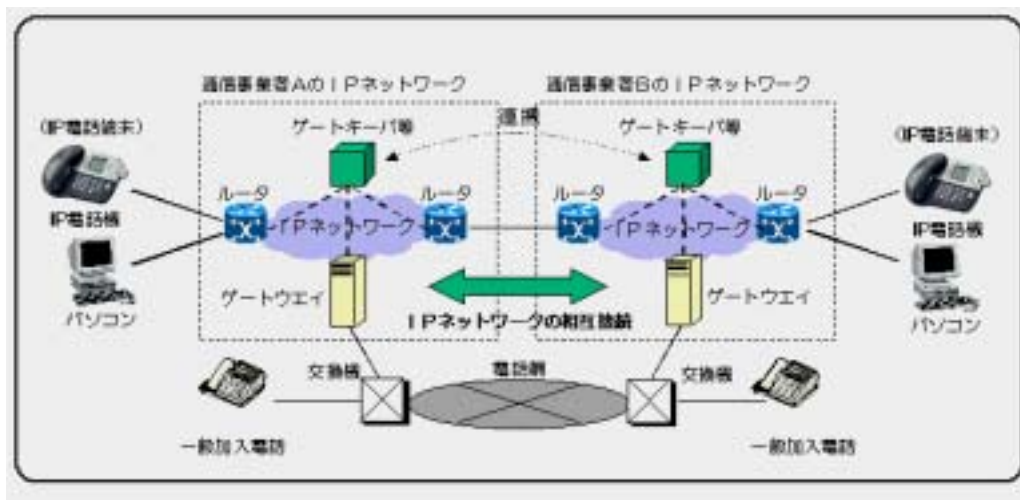


図5. 事業者間における IP ネットワーク相互接続⁽¹⁾

番号管理には、電話番号と IP アドレスの対応をインターネット上のホスト名・IP アドレス管理を行なっている DNS のような分散データベース機能を利用した ENUM(Telephone Number Mapping) 機能が検討されている。導入が進んだ場合は現在のゲートキーパーがこの機能を持つことになり、複数事業者間での連携をもちかるとともに、ENUM サーバの運用・管理体制を整備していくことになる。

新しいサービスの出現

従来からある単なる通話サービスのみならず、ブラウザやメール、グループウェアとの連携など IP ネットワークの特徴をいかしたアプリケーションが開発されていく。ブラウザと電話を連携するサービスとして、クリックでダイヤルしたり、音声でコンテンツを取得したりする機能を実現するためのプロトコルとして、IETF の PINT(PSTN and Internet Interworking)がある。また、キャッチホンのようなコールウェイティングを実現するためのプロトコルとして、SPIRITS(Service in the PSTN/IN Requesting Internet Service)がある。通話料金が定額であること、マルチセッションが可能であることから、従来の電話のように接続・通話・切断のプロセスが不要となり、コミュニケーションスタイルに大きな変化がもたらされると予想される。インスタントメッセージのように、通話者相互で自分の状態を知らせておくことで、相手の都合に合わせた通話が可能となる⁽⁶⁾。また、自分から音声情報を発信するサーバ型・プッシュ型機能や同報通話のためのマルチキャスト型機能も当然のように組み込まれていくとみられる。

IPv6 への移行

IPv4 のグローバルアドレスの枯渇とそれを解決する IPv6 への移行に時間がかかっている中で、現状を開拓する技術として、NAT や DHCP などを利用することによりインターネットユーザ層が拡

大してきたことは否定できない。NAT 環境では VoIP 以外にもユーザどうしのファイル交換などのピア・ピア(P2P)通信やマルチキャスト技術を利用した映像配信型放送サービスは利用しにくいのが現実である。今後、NAT などを利用している事業者は、ユーザ層の拡大やサービス向上のために IPv6 への移行を加速する必要に迫られるであろうが、使用しているハードウェアや OS、ライブラリ、アプリケーションなどユーザ側の事情もあるのでその移行期間は長いと予想される。IPv4 環境のネットワークも完全にはなくならないであろう。移行期間中は、従来の環境でも新しいサービスを利用できる技術や移行のためのさまざまな技術が導入されて少しずつ IPv6 環境へ移行していくものとみられる。今回の実証実験もそのような流れの中での試みのひとつであり、その成果が共有され、よりよい技術となっていくことが望まれる。

セキュリティ対策

現在、社会問題となっている迷惑メール、コンピュータウイルス、ハッキングなどと同様の問題が VoIP 通信においても起こることが予想される。例えば、発呼元を詐称した大量通話などがプログラムを作れば簡単にできるようになる。そのため、システム上の対策をとるとともに、関係団体・組織などで適切なセキュリティ対策がとれるような協力体制が必要である。

参考文献

- (1) 総務省「IP ネットワーク技術に関する研究会」報告書 (2002)
- (2) Henry Sinnreich, Alan B. Johnston, Internet Communications Using SIP: Delivering VoIP and Multimedia Services with Session Initiation Protocol, (2001) John Willey & Sons
- (3) 平中幸雄、金子勉、武田利浩、高尾哲康、原田茂芳、マルチメディアにおける CATV 網の活用に関する研究、通信・放送機構 新規事業創出型研究開発成果報告書 (1999) 412-457
- (4) 高尾哲康、音声・データ統合 IP ネットワークの構築、山形県立米沢女子短期大学紀要、34(1999) 61-77
- (5) インターネット快適利用環境整備に関する実証実験報告書 - CATV 回線を利用した地域・広域 VoIP ネットワークの構築 -、地域マルチメディア・ハイウェイ実験協議会 21 (2002)
- (6) 松田正宏、VoIP がもたらす新しい端末と応用、情報処理 42(2)(2001) 124-127

