



アドホックネットワーク構築技術

— WIDE合宿ネットワークを例にして —

三川 荘子* 高田 寛** 長健二郎***

近年、各種イベント・実験などを通じて、最新のインターネット技術を適用したアドホックネットワークの構築を必要とする機会が増加している。アドホックネットワークとは、さまざまな技術が集約された総合的かつ実践的な環境である。また、このような環境を利用することにより、新技術を実環境下において集中的に検証することができる。このように、アドホックネットワークを構築する目的はさまざまであり、構築・運用の際には、目的に応じたデザインをもとに敷設・運用・次回につなげるための評価を行う必要がある。しかしながら、そのノウハウを文章化したものは非常に少ない。

本連載では、WIDE合宿を例として、最新のインターネット技術の紹介およびアドホックネットワーク構築の具体的な技術・知識および経験の蓄積を紹介する。WIDE合宿とは、インターネットの基盤技術をリードするWIDEプロジェクトが年に2回行っている合宿であり、アドホックネットワークの構築・運用およびそのネットワークを用いたさまざまな実験が行われる。

第1回目は、アドホックネットワークの構築に必要な導入編として設計、準備、設営、運用、撤収という作業の概要とそこでの留意点、中でも電源やネットワークの配線に関する部分に重点を置いた説明を行う。

本稿および本連載の概要

短期間でのネットワーク敷設・運営の技術は、学会などのイベント、会議、各種実験の運営上必要な項目の1つになりつつある。ネットワーク従事者にとって、簡易ネットワークの構築は、ミーティング時や一時的な作業環境にも欠かせないものになっている。また、災害時にインターネットをライフラインとして利用するなど、さまざまな形の臨時ネットワークが必要となりつつある。本稿では、このような状況を踏まえ、アドホックネットワークの構築技術について解説する。本連載では、アドホックネットワークを用いて、実際に運用し検証されている最先端のインターネット技術の具体的な紹介し、アドホックネットワークでの評価などについての報告を行う。

アドホックネットワークを設計する際は、ネットワークの目的を明確にし、会場・機材・技術・労力・コスト・ロジスティクスなどの制約の把握、利用可能な

技術の検討・設計、トラブルの予測と対応策の検討が必要となる。それらの項目を踏まえたうえで、準備・設営・運営・評価・撤収を行う。

本連載では、WIDE合宿を具体例として、アドホックネットワーク構築の実際を紹介するとともに、アドホックネットワークを用いて実際に運用され評価されている最先端のインターネット技術に関する解説を行う。WIDE合宿ネットワークは、250人のユーザをサポートすると同時に大がかりな実験を行う大規模アドホックネットワークであり、アドホックネットワークの問題が凝縮されているとともに、多数の技術が集約化され運用される総合的かつ実践的な運用環境となっている。

WIDE合宿ネットワーク

WIDEプロジェクトは、「右手に研究、左手に運用」を掲げ、実証実験を通じた研究を重視し、プロジェクト参加組織間を接続する広域ネットワークの構築と運用を研究活動の基盤としている^{1), 2)}。普段の研究活動に加え、年に2回の合宿と年4回の研究会を行っている。

* 慶應義塾大学 funya@sfc.wide.ad.jp

** NECネットワーク開発研究所 takada@netlab.nec.co.jp

*** ソニーコンピュータサイエンス研究所 kjc@csl.sony.co.jp

本研究は、JGN (Japan Gigabit Network) を用いた通信・放送機構との共同研究 (プロジェクト番号4) です。

■ WIDE合宿の概要・目的

WIDE合宿は、春と秋の年2回、WIDEプロジェクトの研究者の多くが一堂に会して3泊4日で行われる。参加人数は徐々に増加しており、2000年3月の合宿では約250人に達した。参加者は全員がネットワークに関連した研究者であり、その多くがラップトップPCを持参する。合宿では、同時に大規模なネットワーク実験が行われる³⁾。

合宿のプログラムは、全員が参加するプレナリセッション、研究発表、テーマごとに分かれた技術セッション、分科会に分かれた活動、ネットワーク実験などから構成される。会場は、全員が収容できるプレナリルーム、分科会や技術セッションのための3つの会議室、ターミナルルーム、各種実験を行うためのNOC (Network Operation Center)に分かれ、これらの部屋はすべてNOCを介してインターネットに接続される。

WIDE合宿は、WIDEバックボーンの運用とそこでの研究活動に関する具体的な活動計画をメンバ全員で議論する場である。また、それと並行して研究発表やネットワーク実験が実施され、研究と運用をリンクした活動が行われる。

WIDEプロジェクトの合宿には以下のような目的がある。

- **コンセンサスの形成**：残念ながら現状のネットワーク上のコミュニケーションだけでは、多人数の合意を形成するのは困難である。特に、広域ネットワークの運用やプロジェクトの方向性に関する意思決定には、定期的な顔を合わせての話し合いが欠かせない。
- **人的ネットワークの形成**：合宿は、各分野の専門家から最新の情報が得られる機会である。各々の専門分野に加え、他分野のメンバからの情報も得ることで、縦と横のつながりができ、そこから新しい実験テーマが生まれることもある。
- **ルーチンワークからの隔離**：ふだん、地理的に分散している多忙なメンバが一堂に会して研究活動に専念できる機会となる。
- **次世代ネットワーク環境の模索**：ネットワーク技術の専門家が集まって作業環境を作成することは、次世代のネットワーク環境やワークスタイルの先取りとなる。たとえば、1人1台のラップトップPC利用や、無線LAN環境の構築はWIDE合宿では早い段階から行われてきた。また、そこで必要となったDHCPやデバイスドライバなどの技術開発がなされてきた。
- **新技術の実証実験**：新技術を参加者に紹介すると同時に、本格的な広域での利用に先立つ運用テストを行う。参加者はネットワーク技術一般についての知識はある

ものの、特定の実験に十分な知識があるとは限らない。そのため、新技術の普及に必要な教育を行ったり、実装などに関するフィードバックを得たりすることができる絶好の機会となる。

■ 合宿ネットワーク

合宿で構築されるネットワークは、ユーザに対するサービスネットワークと、実験ネットワークが統合されたものである。

ユーザが利用するネットワークは生活ネットワークと呼ばれる。利用者はネットワークをふだんから頻繁に利用している研究者の集まりであるため、単にメールやWWWの利用にとどまらず、遠隔からネットワークオペレーションを行ったり、本格的なソフトウェアの開発やインストール作業をネットワーク経由で行うなど、多様なトラフィックが発生する。また、多くのユーザがIPv6を利用するのも近年の大きな特徴である。

実験ネットワークにはさまざまな新技術が導入される。WIDEで開発中の技術や新製品が混在する統合ネットワークを構築し、そこに生活ネットワークの実トラフィックを流すことによって動作を検証する。

また、WIDEでは、災害時のライフラインの1つとして、衛星回線を使ったインターネット接続技術を位置付けている^{4), 5)}。合宿を機会に、可搬型アンテナを用いた運用演習を定期的に行って、いざという場合に迅速な対応ができるように備えている。

WIDE合宿のネットワークは、新しい技術の導入や実験を重視しているため、メールやWWWの利用のみを目的とするような一般のアドホックネットワークとは大きく異なる。しかしながら、ユーザのための生活ネットワークと実験ネットワークを共存させるなど、アドホックネットワークのさまざまな要素が含まれており、アドホックネットワーク作成において参考になる部分が多い。

■ 実験ネットワークの目的

合宿で大がかりなネットワーク実験を行うことには以下のような目的がある。

- **新技術の実証実験**：IPv6やQoSなどの先端技術を積極的に取り込み、合宿参加者の生活トラフィックを流すことによって、実験室レベルでは不可能な実トラフィックを使った検証ができる。本格的な広域利用に先立つ運用テストとして位置付けられる。
- **研究成果の実証の場**：合宿での実験は、研究者にとって自分の研究をアピールする機会である。また、合宿に合わせて実験ができるように研究スケジュールを立てることは研究の節目となり目標ができる。

- **新技術の紹介と問題点のフィードバック**：ユーザにとっては新技術を体験する機会となる。また、実験実施者にとっては、自分の研究成果を知ってもらい、ネットワークの先駆者からの貴重なフィードバックを直接得る機会となっている。
- **統合実験による新技術の検証**：個別に開発されている技術を統合して実験を行うことにより、プロトコル上や実装上の問題点が顕在化し、洗い出しができる。合宿での統合実験以前に、実験室レベルで可能なデバッグや評価を十分に行っておく必要がある。
- **ネットワーク構築全体のプロセス体験**：統合実験環境のインフラからアプリケーションまで含めた設計、準備、運用、トラブル対応を通して、ネットワーク構築の全体のプロセスを実践的にシステムエンジニアリングする。
- **ネットワーク技術者の育成**：合宿ネットワークの構築、実験は若手の技術者が中心になって行われる。彼らにとっては、先輩研究者の技術を学び、仲間とともにネットワークの構築と運用の全体を体験する貴重な機会である。合宿ネットワークは、次世代のネットワーク技術者を育成する場となっている。

■ 実験の概要

実験ネットワークは毎回構成が変わるが、図-1に2000年3月に行われた合宿の構成を示す。外部とは1.5Mbpsの臨時専用線で接続し、内部ネットワークは6つのセグメントに分割されている。各セグメントで

は、IPv4とIPv6両方が利用可能である。

以下に実施された各実験の概要を挙げる。

- **外部への接続(以下、対外線)**：会場に近いJGNのアクセスポイント(山梨県中巨摩郡玉穂町)に1.5Mbpsの臨時専用線を設置し、会場に設置したATMスイッチを用いてATMで接続した。この上に3本のVCを設定して、JGN経由で2本をWIDE 藤沢NOCに、1本をWIDE 奈良NOCに接続した。藤沢への1本はIPv4専用で、IPv6は藤沢と奈良にマルチホーム接続した。
- **ユーザからの要求による帯域割り当て**：ユーザが帯域を動的に予約できるシステム。COPSプロトコルによる予約の管理と、Diffservによる集約フローの優先制御を実現。
- **OSPF6**：IPv6の経路制御はOSPFを用い、マルチホーム環境で運用。
- **DNS Dynamic Update**：ユーザが自分でIPv6アドレスの逆引きレコード(PTRレコード)を登録できるシステム。
- **データリンクの抽象化技術**：データリンクを抽象化して、VLANやマルチリンクを透過的に扱うシステム。実験ではVLANシステムとして運用。
- **DV中継**：DV over IPによる会議室中継。
- **高負荷WWWサーバ**：WWWでインターネット中継を行い、WWWサーバの負荷解析を行った。
- **ネットワーク監視**：サーバ状態や各セグメントからの接続性のモニタリング、RMONによるトラフィック情

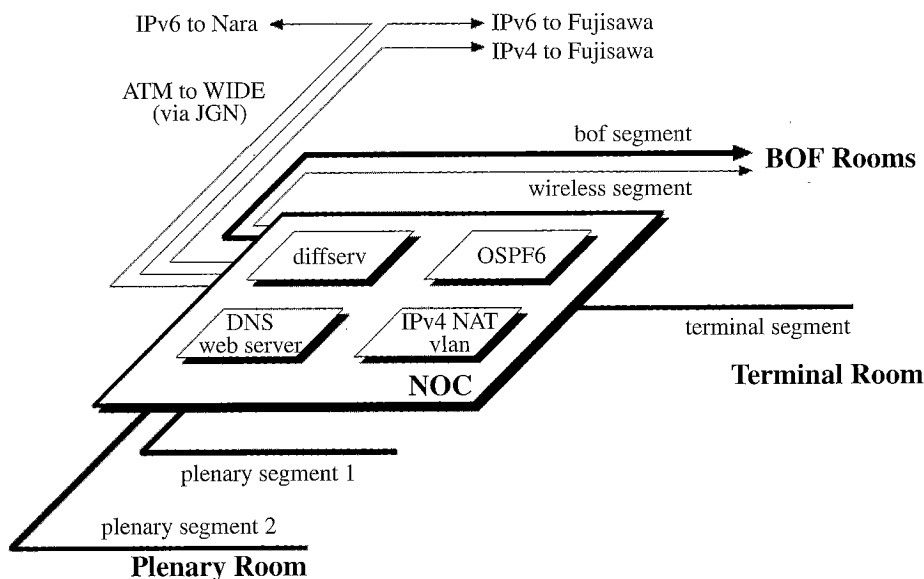


図-1 2000年3月の合宿ネットワーク構成

報の収集。

- **トラブルチケットシステム**：障害レポートシステムの運用。
- **無線LAN相互接続実験**：802.11b準拠の製品の相互接続実験。

この他にも、1999年9月の合宿では、衛星回線による接続、IPv6をIPv4に変換するトランスレータ、ホテルの構内電話網を使ったvDSL、IPv6対応ダイアルアップルータなどの実験が行われた。これらの実験の内容は連載の中で取り上げていく。

合宿ネットワーク構築の実際

合宿ネットワークの運営は、ネットPCと呼ばれる20人程度のボランティアグループが担当する。ネット

PCは、チェアを中心に、各実験グループの代表者とネットワーク設計や構築作業に興味を持つ若手メンバなどで構成される。ネットPCは、合宿全体の運営を担当する合宿PCと連携して、4カ月程度前から準備を始める。

■ネットワーク設計と事前準備

ネットワークの設計は、実験の募集と会場の選定から始まる。会場の選定は、合宿PCが最終的に判断するが、ネットPCはネットワークの構築に関する部分を検討する。実験に必要な設備やネットワークに接続される機器の数などの要件を整理し、さまざまな制約を勘案しながら会場の適性を検討する。会場の制約としては対外線の接続点、電源容量、会議室間の距離などが挙げられる。入念な下見を行い、会場の制約を前もって把握しておく。

対外線の種類や帯域は、主にネットワークの利用用途やコストによって決定される。合宿ネットワークで

付録

ネットワークケーブルを敷設する際の注意点

◇ケーブル不良は原因究明に時間がかかる。ケーブルを作成する際には以下の点に留意する。

- 圧着工具はコネクタと同じメーカーのものを利用する。
- 単線用と撚線用のコネクタは違うので注意する。
- 圧着後、被覆部分もコネクタに圧着されているか確認する。
- 圧着状態の確認のため、圧着後1度引っ張ってみる。
- 作成したケーブルはテストでチェックする。

◇長いUTPケーブルの配線を行う場合は、圧着されていないUTPケーブルを使って配線し、その場でコネクタを圧着する。その際、両端は余裕を持って長めに切断し、末端処理は最後に行う。

◇UTPケーブルのツイストペアは信号によって撚り方が異なっているので、配線順序を守って圧着する。圧着配線の規格には複数あるので、事前に打ち合わせて統一する。

◇長いケーブル配線を行う場合は、内部断線の可能性を考慮して、1本余分にケーブルを通しておく。

◇外部接続用機器などには、コネクタ形状がRJ48Cのものや、コネクタはRJ45だが配線が異なるものがあるため注意する。

◇ケーブルの敷設の際は、ケーブルが機材の下敷きになったり、無理な配線をして、ケーブルに負荷をかけないように注意する。

◇ガムテープの下でケーブルがねじれてしまうと、安定し

た固定ができなくなるので注意する。

◇ケーブルは縦方向だけでなく横方向にも固定するとより安定する。

◇ドア付近や、椅子・机付近には極力配線を行わない。配線を行う場合は、ガムテープを二重に貼って厳重に固定する。

◇同じ場所に何本もケーブルを重ねて敷設し、その度にガムテープで固定しないよう注意する。見栄えが悪くなるうえ、撤収が困難になる。

◇ガムテープなどの使用は事前に会場側に許可を求める。ガムテープは布製のものを利用する。紙製のガムテープは剥がす際に跡が残る。また、新素材のきれいに剥がれるテープもある。

◇ケーブルを識別するため両端に接続点を示すシールを貼っておく。目的によって違う色のケーブルを使い分ける。

◇UTPケーブルを曲げ過ぎたり、圧着が不十分だと規格どおりの性能が得られない場合がある。

◇UTPケーブルは100mを超えないよう注意する。100mを超える場合はスイッチで中継する。壁際を引き回すと予想以上に長くなる場合があるので、必ずケーブルテストで距離を測る。100mを超える配線にはファイバを利用することも考えられるが、ファイバは内部断線しやすい、取り扱い時にケガをしやすい、曲げに弱い、長さ調節が困難などの問題がある。

は対外線を利用した実験が行われるため、実験目的に適した対外線が用意される。

会場によっては、必要な電源容量を確保するために工事が必要な場合もある。電源容量は、利用する機材と参加者が各々持参するラップトップなどを考慮して必要な容量を算出する。

会議室間の距離も重要な要素である。100Base-TXを利用する場合、ネットワーク間の距離は200mに制限される。また、ケーブルを敷設する場所や方法についても検討する必要がある。会場によってはガムテープなどによるケーブルの固定が許可されない場合やパイプスペースなどが利用できない場合もあるし、逆にOAフロアが用意されている場合もある。

会場が決定すると、具体的なネットワークの設計に入る。ネットワークの設計段階では、目的を明確にして、制約を考慮しながら、トポロジを決定していく。統合実験ネットワークを構築するために、個々の実験の要求を満たすようなネットワークを作成するため、メールでの議論に加えて数回のミーティングを行い、合意形成をする。

設計段階で障害を予測し、実験の相互依存性を低減する工夫をする。また、事前に実験の評価項目をリストアップし、評価の実施スケジュールを立てる。

トポロジが決まると、IPアドレスを割り当て、さらに、会場の見取り図を重ね合わせながら必要となる機材とその配置を考える。機材を選出した後、実際の会

場図に配線図を書き込み、機材の配置を決定する。その際に、電源ケーブル、ネットワークケーブルの配線も検討し配線図を作成する。

合宿本番直前には、ホットステージと呼ばれるリハーサルを行う。実際に合宿に持ち込む機材を使って、できるだけ本番に近い構成でネットワークを構築し、各コンポーネントの動作確認と相互接続を検証する。ホットステージで設定作業のほとんどを完了しておけば、現地での設営が順調に行える。

■機材調達と運搬

合宿での利用機器の大半は参加組織から借用する。必要機材のリストを元に各組織に機材の貸し出しをお願いする。後からサービスが追加されたり、トポロジが変更されても、迅速に対応できるよう機材は余裕を持って準備する。

短時間でのネットワーク設営の際は、機器の管理がおろそかになりがちなので、担当者を決めて機材管理を行う。借用機材のリストを作成して、各機材にシリアル番号および借用元を記したシールを貼付する。

機材担当者は、要求事項を整理して、設営の際に必要な機材が必要な時間に必要な場所に届くように運搬計画を作成する。

付録

電源ケーブルを敷設する際の注意点



- ◇電源容量を計算する場合、各場所に約何人のユーザが接続するかを想定して電源を提供する。セッションの開始時などに、ほとんどのラップトップが同時に充電を始める可能性も考慮する。VGA プロジェクタなどは消費電力が大きいので注意が必要。定格容量の積み上げでは必要容量が大きくなりすぎる場合は、定格容量の8割程度を目安に供給して、実測しながら運用する方法もある。
- ◇電源のアウトレット工事は業者に頼むと材料が使い捨てになるため高価になる。業者には配電盤まで用意してもらい、電源リールで引き回すと安く電源配線ができる。
- ◇電源リールのドラムは巻いたまま利用してはいけない。利用しているうちに熱を帯びて熱くなり、ケーブルが溶けたり、最悪の場合には燃えてしまう。

- ◇壁コンセントの容量を把握する。片側の壁のコンセントは、全部同系統のことが多い。負荷を分散させる工夫をする。
- ◇電源容量の問題から、利用して欲しくないコンセントにガムテープなどを貼って利用できないようにする。
- ◇ブレーカの容量は20Aでも、テーブルタップは15Aである場合があるので注意する。
- ◇単相3線式は、バランスにも注意して設置する。
- ◇多段接続や細い電源ケーブルによる電圧低下に注意する。外国製機器は115Vを標準としている。個体差で動作しない機器が出てくる。
- ◇必ずアースを取ること。アースを取らないと電位差による部品破壊や感電、ノイズの誘導を起こす。

■設営

WIDE合宿では、ユーザに提供する公共的なサービスとして、基幹の電源とスイッチを提供し、各参加者は自分で最終段の電源タップとハブを用意することになっている。

設営に当たっては、まず、電源・幹線の配線が終了しないと他の作業が始められない。ケーブルは設計図を元に配線担当チームで行う。配線方法を統一するため、準備段階で簡単な講習を実施する。配線の際の注意点を付録に載せたのでそちらも参照して欲しい。

期間の配線が終わると、次に外部との接続を行う。ここまでくると、ネームサーバの立ち上げをはじめとして複数の設営作業を並行して行うことができるようになる。

■運用

実験ネットワークの運用には障害発生がつきものである。障害対応には、障害の検出、原因の究明とその解決がある。設計段階で、発生し得る障害を予測して対応を検討しておく。また、1つの障害が連鎖的に問題を起こさないよう配慮しておくことが重要となる。

合宿中は、障害監視チームがネットワークのモニタリングにあたる。また、迅速な障害対処のため、トポロジや機器の配置を常に把握し、最新の情報を共有する工夫も必要である。トラブルチケットシステム等も有効であるが、ネットワークの障害情報をネットワークを介して管理することには限界がある。最終的には、ホワイトボードなどによる管理が確実である。

各実験の実施者は、事前に計画したスケジュールに基づき、評価データを取得して研究成果が示せるようにする。また、何らかの理由で予定していた評価が行えなかった場合も、問題点のレポートを作成して次回に反映できるようにする。

■撤収

次回に利用するときのことを考慮し、整理しながら撤収する。撤収は短時間に行われるため、借用した機材が紛失することがないように、責任者が借用機材のリストに従って点検し、返却もしくは発送する。責任者は最後まで会場にとどまり、忘れ物がないよう最終チェックを行う。

■反省会

合宿中に次回のネットPCの主要メンバを選出して、合宿終了後にこれらのメンバを交えて反省会を開き、引き継ぎと運営プロセスを見直す。また、各実験についても、実験報告書を作成して、成果のまとめと反省

を行う。

まとめと今後の課題

連載第1回目の今回は、WIDE合宿ネットワークの概要と、ネットワーク構築の仕事の全体について紹介した。

WIDE合宿が始まった当時、会場にネットワークはなかった。1992年に初めて電話回線を利用したネットワークが引かれた。90秒間データの送受信が行われなければ切断される仕組みだった⁶⁾。現在では、合宿のたびに、250人のユーザをサポートし、大がかりな実験が行なわれる大規模なアドホックネットワークが構築されて、常に新しい技術が取り入れられている。

一方で、実験項目が増加し内容も高度化しているため、統合実験の問題も出てきている。持ち込まれる個々の実験の完成度や障害への対応準備には、どうしても大きな格差ができる。1つの実験に障害が発生すると他の実験も影響を受け、場合によってはネットワーク全体が機能しなくなることもある。また、実験内容の相互干渉により、個々の実験を正當に評価するのが難しくなっている。

今後の課題として、統合実験環境の構築、障害検出とその対応、実験の評価等をシステムティックに行う手法の確立が上げられる。実験実施者とは独立した専門部隊を作成し、人材を育成することも考えるべきであろう。ネットワークの構築と運用のノウハウは、経験と失敗を重ねて身に付いていき、生きたネットワークの中で示される。このことが、WIDEプロジェクトが実証実験に根ざした研究を行う理由である。

今回は、外部との接続で利用されるDNS、NAT、衛星回線について説明する。続いて内部の接続で利用される無線LAN、構内vDSLについて述べ、その後、各実験の詳細を紹介していく。

参考文献

- 1) 村井 純: WIDEプロジェクトとその研究活動, 情報処理, Vol.39, No.5, pp.401-407 (May 1998).
- 2) 加藤 朗, 渡辺恭人, 中村 修: WIDEテストベッドとその運用, 情報処理, Vol.39, No.5, pp.408-414 (May 1998).
- 3) 宇夫陽次郎, 石山政浩, 新 善文, 村井 純: 大規模な仮設ネットワークテストベッドの設計・構築とその運用, インターネットコンファレンス'97 (Dec. 1997).
- 4) 馬場始三, 篠田陽一: 第1回インターネット防災訓練と生存者情報データベース, インターネットコンファレンス'96 (Dec. 1996).
- 5) I Am Alive Project: <http://www.iaa.wide.ad.jp/>
- 6) 村井 純, 楠本博之, 加藤 朗, 稗田 薫: 会議とネットワーク環境, プログラミングシンポジウム, 情報処理学会 (Jan. 1992).

(平成12年6月14日受付)