LAN 用インタフェース(2)

—インターネットワーキング技術—

西田 竹志†

1. ま え が き

LAN 技術の発展はホスト CPU の高速化, ネットワークアプリケーションの増大と同時並行して進んできた。本文ではこのような LAN 技術の発展の経緯を見ながら, 最新の LAN 技術について紹介していく。

現在, オフィス環境を考えた場合, 電話通信と同じぐらいの割合で LAN を使ったデータ通信が利用されている。今後の予想としてトラフィック量としては, 近い将来に電話需要を超えることが予想されている。これはインターネット, あるいはイントラネットの増大とともに拍車がかかけられつつある。LAN 技術の発展は, このような大量のデータを送るための大容量化, そして大量のデータを瞬時に送るための高速化, さらにデータだけでなく, 音声, 動画像までも送るためのリアルタイム保証技術の組合せで進められてきている。

また LAN の大規模化のためのルータ, ハブ, スイッチなどの技術は, この 10 年で飛躍的に進歩を遂げてきた。さらに ATM 技術, 光ファイバを駆使した高速 LAN 技術の進歩には拍車がかかってきている。本文ではこのようなホットな領域の技術のスナップショットについて説明する。なお, LAN 間接属機器については, 表 1 に簡単にまとめて記す。

2. ケーブル型 LAN

ケーブル型 LAN は LAN の初期の形態で, 同軸ケーブルをオフィスやキャンパス内に敷設している。トランシーバと呼ばれる回線上を流れる信号の送受信を行う装置を介して, ホスト端末は LAN のケーブルに

表 1 LAN 間接続機器

リピータ	LAN のケーブル長を伸ばすために電気信号を終端して, デジタル信号の回復を行う装置
ブリッジ	データリンク層レベルのフレームを終端して, LAN 間接続を行う装置
ルータ	ネットワーク層レベルのパケットを終端して, LAN 間接続を行う装置
ゲートウェイ	異なった種類のネットワークを相互接続する装置として一般的に使われるが, アプリケーションレベルの相互接続を行う装置の意味として使うこともある

接続される。ホストには NIC(Network Interface Card)と呼ばれるホストバスに直結されるボードあるいは PCMCIA カードが挿入され, それで LAN と接続される。NIC ではメディアアクセス制御*1 や信号の送受信, 受信信号の符号化・復号化などの処理が行われる。

また, これはケーブル自身を共有する共有型 LAN の典型である。イーサネット/IEEE 802.3, トークンリング, トークンバスといった代表的な LAN は, 当初すべてこの形態をとっていた。1つのホストから送信されるメッセージは, そのケーブルに接続されている全ホストが受信可能であるため, 放送型(ブロードキャスト) LAN とも呼ばれる。

しかし, この型の LAN は次に述べるような欠点を持っているため, ハブ型 LAN に置き換えられてきている。

- (1) ケーブルが切断されるなどの障害にあった際に, 障害を特定するのに時間や手間がかかり信

† C & C Research Laboratories, NEC USA, Inc.
“Digital Interface; (7) Local Area Network Interface (2)—Internetworking Technologies” by Takeshi Nishida (C & C Research Laboratories, NEC USA, Inc.)

*1 メディアアクセス制御(MAC: Media Access Control)とは, 複数のホストで共有しているケーブルに同時に複数のホストからメッセージ送信をしても, メッセージが壊れたりしないようにするための競合制御のことである。

頼性が悪い。

- (2) オフィス内にケーブルを引きまわすため景観を損ねる。また、それを隠すために床上げ工事などが必要となってしまう。
- (3) 同軸ケーブルは線が硬くて太いため融通性が悪く、回線工事に専門性が必要となる。これはレイアウト変更などが多いオフィス環境では無駄な出費になってしまう。

ケーブル型 LAN の代表は Ethernet であるが、これは 1972 年 Xerox 社 PARC (Palo Alto Research Center) で Metacalfe によって考案されたが、最初の製品化は Xerox 社ではなく、そこでイーサネット開発に携わっていた技術者が飛び出して作った会社 3 Com Co.*2 で行われた。

3. ハブ型 LAN

これも共有型 LAN の一種で、ケーブルをオフィス内で引き回すのではなく、ホストらの線を 1 ヲ所に集線して、そこでイーサネットやトークンリングの LAN を構成しようとするものが出現した。これがハブ型 LAN と呼ばれるものである。各ホストを接続するケーブルを集線しているボックスのことをハブ (Hub) と呼ぶ*3。

イーサネットハブでは、図 1 に示すようにホストとハブのインタフェースは AUI と呼ばれる標準インタフェースで接続されることになり、ハブ内ではケーブル型の LAN と同様に CSMA/CD と全く同じメディアアクセス制御が行われる。このため、ホスト側の NIC はケーブル型 LAN と全く同じものが使える。NIC とハブ間のケーブルは通常、撚り対線 (Twisted Pair Cable) が使われることが多い*4。

ハブ型 LAN ではケーブルが引き回される形態ではないため、融通性が高くなる。ケーブルも細い撚り対線

図 1 ハブ型 LAN

でホストとハブが結ばれるだけで、ハブというボックスの中で LAN が構成されているので、上記にあげた欠点を解消することができる。ハブ自身は数ポート分のものから 100 ポートぐらいのものもあるが、AUI インタフェースケーブルは 100 m ぐらしかサポートできないため、規模の大きな LAN を作りたいときや収容ホスト数を増やしたいときにはハブを複数接続する必要がある。この時は同軸ケーブルや光ファイバが使われることが多い。

ハブ型 LAN は最初イーサネットの同軸ケーブルを、より使いやすい細いケーブル (撚り対線) で、しかも、電話ネットワークのように交換機を中心とするスター型のネットワークにしてケーブルの終端を簡易化したい*5 という発想から生まれた。最初のハブ型 LAN は Intel, AT&T, NCR 共同開発のスター LAN と呼ばれるもので、電話線の撚り対線 (UTP: Unshielded Twisted Pair) を使ったものであった。これは IEEE で 1986 年 1 BaseT*6 (撚り対線を用いた 1 Mb/s イーサネット) として標準化された。当時の技術としては、撚り対線を使って 1 Mb/s の伝送速度を達成するのが精いっぱいであった。しかし、PC の CPU はどんどん高速になってきたため、1 Mb/s という速度は不十分になってきたことと、SynOptics 社*7 が撚り対線で 10 Mb/s の伝送速度を達成したことによってスター LAN は次第に使われなくなった。

ハブ型 LAN は、10 BaseT と呼ばれる撚り対線を用いたイーサネット技術の標準化によるところが大きい。

*2 Computer, Communication and Compatibility (3 Com) Co.である。余談であるが、イーサネットの発明者の一人である Metacalfe は当時 Apple の社長であった Steve Jobs に Apple に招かれたこともあるが、それを断って 3 Com 社の設立に携わった。3 Com は当時登場したばかりの IBM PC のイーサネット NIC の開発を行い、その VLSI 技術の先進性で低コストで小型の NIC (当時別に必要であったトランシーバとトランシーバケーブルを内蔵) をいち早く市場に出し、イーサネット NIC のデファクト標準を確立することになった。一方、当時 IBM 社はトークンリングで手いっぱいであってイーサネットまで手が回らず、この大市場はサードベンダーに開放されることになった。

*3 このためハブ型 LAN のことを LAN-in-a-Box (箱の中の LAN) と呼ぶこともある。

*4 イーサネットの場合は 10 BaseT。

*5 同軸ケーブルを使ったケーブル型ネットワークでは、ケーブルの両端に信号が反射しないように終端抵抗をつける必要がある。また、ケーブル型 LAN ではユーザホストが接続されるところで異常な信号が流れたりすると、それでネットワーク全体が使用不能になる。

*6 最初の数字は伝送帯域 (単位 Mb/s)、最後の文字は伝送媒体 (T: 撚り対線) を表す表記法。

*7 現在の Bay Network 社。

図2 ハブの構成

3.1 ハブの構成要素

ハブは図2に示す要素で構成される。

- ・バックプレーン

ハブの中心になる要素で、異なったLANセグメントを収容するモジュール間を接続するバスを収容するボードである。バスはLANセグメント間で受け渡されるデータや、モジュール間でやりとりする制御情報を中継する。

- ・チャンネル

データを中継するバスをチャンネルと呼ぶ。ハブのバックプレーンは少なくとも1つのチャンネルを持ち、LANセグメント間のデータはこれを介してやりとりされる。この場合は競合制御するための調停機構が組み込まれる例としては時間分割で各モジュールがチャンネルを占有するTDMA (Time Division Multiplex Access) という方式がよく使われる。またLANセグメント毎や、ネットワークタイプ毎にチャンネルを分離することもある。さらに管理情報を特別に扱うために、データチャンネルと管理データを流すチャンネルを分離する場合もある。LANセグメント間のトラフィックが多い場合や、収容するモジュール数が多い大規模ハブの場合は大容量バスを構成するために、ATM交換を使うケースもある。近年、LANのトラフィックが増加してきており、このアプローチは注目を浴びている。

- ・架

ハブの箱で、モジュールを挿入するためのスロットを複数持つ。また電源や制御用のユニットを収容している。

- ・モジュール

LANセグメント毎のイーサネット、トークンリングモジュール、LANセグメント間をつなぐブリッジ、ルータモジュール、ネットワーク監視用の管理モジュールなどがある。1つのLANセグメントのモジ

ュールに接続されるホストは、同じセグメントを構成する。ハブは挿入されたモジュールを自動認識する機能を持っており、ユーザは通常何もメンテナンスする必要がない。

サーバ型のハブもあり、ワークステーションやPCにハブカードと呼ばれるカードを挿入して、ワークグループハブを構成することがある。これによって、ワークステーションやPCのインテリジェンシを利用して、LAを流れるメッセージの処理を行えるようになる。例えば、電子メールのゲートウェイ機能や、メールセンター機能などを有することができるようになる。

4. 光イーサネットと撚り対線

同軸イーサネットの後、Xerox社内では光ファイバを用いたイーサネット、それに続いて、被膜付き撚り対線 (STP: Shielded Twisted Pair) を用いたイーサネットについての検討がスタートした。この技術可能性が実証された後、開発者たちは1985年Xerox社を離れてASTRA社^{*}を興し、光ファイバとSTP用のイーサネットハブの製品化を行った。

1986年SynOptics社はUTPを用いたイーサネット技術の開発に着手し、IEEE 802.3での標準化を提案した(これが10 BaseTと呼ばれるようになった)。

UTPを用いたイーサネット (10 BaseT) の標準化により、イーサネット市場は倍に膨れ上がることになる。また、これによりユーザは電話機と同じような感覚でLANを使うことができるようになり、ハブは電話交換機のようなスター型の形態でホストを接続するようになる。また、ケーブルも電話線と同じUTPカテゴリ-3というものが利用できるようになり、電話線のケーブリングをそのまま使えることになった。

この後、イーサネット技術はいろいろな形態で改良され、イーサネットスイッチ、全二重イーサネット、さらに100 Mb/s、1 Gb/s (ギガビットイーサネット) の高速イーサネット、回線交換と組合せて音声・動画も送れるようにしてISOイーサネットへとつながっていく。これらについては後の章で詳しく説明する。

5. 高速イーサネット

CPUのさらなる高速化と、サーバクライアント型をサポートするネットワークOSおよびそれを用いたアプリケーションの増大とともに、10 Mb/sのイーサネット帯域はトラフィックが集中するサーバで不足す

^{*} この会社はSynOptics Communication社となり、現在はBay Network社となっている。

ることが明確になってきた。ここで登場したのが全二重イーサネット (full duplex Ethernet) と 100 Mb/s イーサネットである。

イーサネットスイッチの登場により、イーサネットケーブルを複数端末で共有するのではなく、ホストを直接イーサネットスイッチのポートに接続して通信し合うようなネットワーク構成が登場してきた。従来の衝突検出型のイーサネットでは、パケット送信中は衝突が起きるかどうかを常に調べるために、自分のパケットを受信側でモニタしている必要があったが、共有型でなくなるとこのような衝突検出が不要となるため、送信受信を同時にできるようになった。これが全二重イーサネットである。送信と受信が同時に可能であるため、LAN の帯域は理論上倍になる。

さらに、イーサネットの速度を 10 倍にするための技術的な検討が始まった。これを手がけたのが Grand Junction 社^{*9} である。1992 年 9 月に製品化を終了し、100 Mb/s イーサネットとして世に出した。

そこから IEEE 802 委員会での高速イーサネット標準化のための戦争が始まった。1992 年 11 月の IEEE 802 委員会で高速ネットワークの方式として 2 つが提案された。1 つは Grand Junction 社を中心とする従来のイーサネットの方式をそのまま使ってスピードだけを 10 倍にするというものであり、もうひとつは HP 社より提案されたイーサネットの CSMA/CD とは違った新たなメディアアクセス方式を用いて 100 Mb/s の転送速度を実現するものである。新たな MAC を用いるというのは、ネットワーク管理者・運用者、あるいはユーザにとっては障壁があるが、優先制御といった機構を持つこの方式は、マルチメディア情報を送るのに適していたため多くの支持も集めていた。2 年あまりの議論の末、802 委員会は、CSMA/CD 型を使った 100 M イーサネットを検討する 802.3 と、新たな MAC を使う 100 M イーサネットを 802.12 の 2 つのサブワーキンググループに分け、両方を標準化することで決着をつけた。802.12 の新 MAC 方式は、デマンドプライオリティ (Demand Priority Access) 方式と名づけられ、この方式を用いた LAN は、100 VG-Any LAN と呼ばれるようになった。

100 Base-X は、イーサネットの 10 倍の高速性を達成するイーサネット 100 Mb/s 版の総称である。

図 3 100 Base-X とそのプロトコル構造

表 2 100 Base-T

	10 Base-T	100 Base-TX	100 Base-FX	100 Base-T 4
符号化方式	マンチエスター	4 B/5 B	4 B/5 B	8 B/6 T
ケーブルタイプ	UTP 3/4/5	UTP 5/STP		UTP 3/4/5
信号速度 (MHz)	20	125	125	25
ケーブル対数	2	2	2	4
送信ケーブル対数	1	1	1	3
距離 (m)	100	100	150/412/2000	100
全二重	可	可	可	不可

MAC は、従来の 10 Mb/s 版のイーサネットと同じ CSMA/CD 方式を用いている。100 Mb/s の速度のイーサネットは、物理層の違いによって種々の形態があり、これらを総称して 100 Base-X と呼ぶ。また図 3 に示すように、100 Base-X の MAC では複数の物理層に対応できるような仕様となっている。MAC は IEEE 802.3 で、また、複数の物理層とのインタフェースは、従来の MAU (Medium Attachment Unit) 相当の MII (Media Independent Interface) が使われる。

ネットワーク構成としては、10 Base-X と同様なハブを中心としたスター型をとれるようになっている。100 Base-X は、その物理媒体の違いにより種々のバージョンがある。

- 100 Base-TX
- 100 Base-FX

^{*9} 3 Com の創立者 Howard Charney, Ethernet の発明者 David Boggs, Thin Ethernet の発明者 Ron Crane らと 3 Com 社の優秀な技術者が設立当時のメンバーに入っている。

・100 Base-T 4

これらの違いについて表2にまとめる(表2では参考のために10 Base-Xの特性についても示している)。

個々の物理層仕様についての説明は以降に示す。

1ビット送信するのにかかる時間を1ビット時間(1 bit time)と呼ぶが、100 Base-Xでは

$$1 \text{ ビット時間} = \frac{1 \text{ ビット}}{100 \text{ MHz}} = 10 \text{ ns}$$

6. スイッチ型 LAN

6.1 背景

LANに接続されるPC、WSの高速化とその数の増大とともに、LANの帯域が不足するようになってきた。またLANの数も増加してきたため、LAN間接続のためブリッジもマルチポート化したものが登場し始めた(1980年後半)。さらに、LANトラフィックの増大に対応するための新たなブリッジが現れた。これがKalpana社が開発したイーサスイッチと呼ばれるものである。イーサスイッチは、多くの点でマルチポートブリッジと異なっていた。

まず、従来のブリッジのように受信したパケットを一度バッファに入れてから、次の転送処理を行う蓄積転送型(store-and-forward)と異なり、カットスルー(cut-through)と呼ばれる手法により、スループットが従来のものに比べて1桁向上した。また電話交換機と同じように、同時に複数のポートからのパケットを処理することができ、装置全体の処理能力が向上した。

機能としては、マルチポートブリッジと同じように、複数のポートを備えて、それらに接続するLAN間のトラフィックをデータリンク層で転送するというものであったが、マルチポートブリッジとはいわずにLANスイッチ、あるいはネットワークスイッチと呼び、ネットワーク全体の帯域を向上させ、1ポート当たりの転送スピードを上げた新たなネットワーク機器としての市場を作り上げた。これは、インターネットのマルチメディア化志向、ホストPCの高速化傾向とマッチして一躍時代の寵児となった。

スイッチ型LANは、共有型LANに対して占有型LANと呼ばれることもある。これは、スイッチ型LANでは各ホストがスイッチ(交換機)のポートに直接接続され、他のポートに接続されているホストと通信する際には、イーサネットの帯域をフルに使えるためである。スイッチ型LANは、可変長のパケットを扱う可変長スイッチと固定長パケットを扱う固定長ス

イッチに分かれる。前者の代表はイーサネットスイッチであり、後者の代表はATMスイッチである。ここではイーサネットスイッチについて説明する。

イーサネットスイッチは、本質的には従来のマルチポートブリッジと同じ機能を持ったものであり、大規模なLANを複数のより小さなセグメントに切り分ける機能をもつ⁹⁹。パケットの転送は第2階層(データリンク層)で行うもので、IEEE 802.1D スパニングツリープロトコルをサポートしており、ネットワーク中のブリッジが故障したとしても、別経路を与えることができるような冗長構成のブリッジネットワークが作れるようになっている。

6.2 LANスイッチの原理

LANスイッチは図5に示すように、共有型のLANと異なって、同じノードに接続されたホスト対でも、それらが異なったポート間であれば同時に通信することができる。

このため、これらのホスト(ホストAとホストB)間では、あたかもポイントツーポイント型の線で接続されているように見える。しかし、スイッチであるこ

図4 LANスイッチと電話交換の類似性

図5 LANスイッチでの同時通信

⁹⁹ 機能的には従来のブリッジなのであるが、マルチポートブリッジと呼ばずに、企業が通常使われている電話交換(PBX)と同じ形態でデータ通信網(LAN)が構築できるLANスイッチ(交換機)として、新たなマーケットセグメントを作ることにより、LANが企業通信管理者にとつきやすくなった。

とによって、必要な時にだけ(ホスト A がメッセージをホスト B に送る時にだけ)接続するので、他のホスト(ホスト C)がホスト B に対して通信したいときには、ホスト A が通信を行っていないければメッセージの中継が行われる。このため、ポイントツーポイント型にケーブルを物理的に接続しているよりも、効率的なネットワークの運用がはかれる。また同時に、共有型の LAN と異なり同時通信が可能で、ネットワーク帯域を増大させることができるという理想的な LAN であり、次世代 LAN として一躍脚光をあびており、値段も現在のハブに比べて 5 倍ぐらいの値段になってきており、今後も半導体技術によりさらに低下することが期待される。

スイッチ型 LAN の能力を表すスループットは、下記の式で表すことができる。

理論スループット性能 = ポート数 $\times$ 回線速度 / 2

例えば、16 ポートの 10 Base-T スイッチは、全体の理論スループットは 80 (10 $\times$ 8) Mb/s となる(これに対して 16 ポートの 10 Base-T マルチポートリピータは 10 Mb/s の性能であり、各ポートに接続されているホストが同時送信をしようとして競合が起きるとスループットはもっと悪くなる)。

イーサネットスイッチは CSMA/CD のアクセス制御を使っているが、1 つのポートに 1 つのホストしか接続されないならば、フレームの衝突も起きないので、キャリアの検出や衝突検出なども不要となる。このため、全二重イーサネットなどを用いるときには最適である。

LAN スイッチはブリッジと同様に、自分のどのポートにどの MAC アドレスのホストが接続されているのかの対応表を持っている。同時通信ができるようにするために、LAN スイッチでは、受信したパケットの宛先 MAC アドレスを見て、MAC アドレス-ポート対応表から出力側のポートを選択して出力する。その時に選択されたもの以外の他のポート側で出力処理がされていたとしても、同時に出力処理ができるようにしている。もちろん選択された出力側のポートが他のパケットの出力処理をしていると、その処理が終了するまで待たされることになる。このため LAN スイッチではバッファを持ち、そこで出力ポートがあくのを待たせる。MAC アドレス-ポート対応表は、ネットワーク運用者によるマニュアル設定、または学

習^{*10} によって作成される。

6.3 LAN スイッチのアーキテクチャ

LAN スイッチは、下記の 4 つの基本要素で構成される(図 6)。

- ポート

パケットの入出力処理を行う。

- バッファ

パケットのバッファリングを行う。10 Base-T と 100 Base-T の間のスイッチングでのスピード調整や、出力ポートでパケットの出力処理がされている際

図 6 LAN スイッチの構成

図 7 LAN スイッチのバッファリング方式
b: バッファ長, M: 回線ポート数

^{*10} Learning ブリッジと同様にパケットを受信した際に、そのパケットの発信 MAC アドレスと入力側のポート番号を覚えておくことによって対応表を作成する。通常キャッシングを使い、一定時間すぎても更新されないと表からその項目は削除される。

(a) シングルバスバックプレーン

(b) マルチバスバックプレーン

図 8 バックプレーン

に自分の順番が来るのを待つためなどに使われる。バッファはパケット入力側に持つ入力バッファ方式と、出力側に持つ出力バッファ方式、全ポートに共有に持つ共有バッファ方式とに分類される。

入力バッファ方式は、バッファの先頭に出力ポートが塞がっていて、処理を待っているパケットがいたときに、その後のパケットの処理まで遅らせてしまう（これを HOL (Head Of Line) ブロッキングと呼ぶ）。これは、スイッチ全体の処理性能を著しく損なう可能性がある。また出力バッファ方式は、複数の入力ポートからのパケットを処理する必要がある、高速のメモリを必要とするため、大量のバッファを持とうとするとコストが高くなる。低速のスイッチには共有バッファ方式が最適であるため、多くの LAN スイッチがこの方式を用いている。

・パケット転送機構

入力ポートから受信されたパケットをどの出力ポートに出すのか、あるいは廃棄するのかを決定する処理を行う。ここには図 8 のバックプレーンがある。

・バックプレーン

ポート間でパケットの受け渡しをするために使われる。図にバックプレーンで用いられるシングルバス、マルチバス方式を示す。シングルバス方式は、総スループットが 1.10 Gb/s のスイッチで、マルチバス

バックプレーン方式は、10~20 Gb/s のスイッチを構成する際に用いられる。後者の方の制御が難しくなるが、より高速のスイッチを構成することができる。

ここで、パケット転送機構とバックプレーンが、LAN スイッチの処理速度（パケット処理遅延）を決定する重要な要素となる。また、バックプレーンは、通常 LAN スイッチの理論スループットに見合った帯域を持つ必要がある。例えば、16 ポート 100 Base-T のスイッチは、800 Mb/s の帯域を持つバックプレーンを実装する必要がある（実際はさらに制御用のトラフィックも流れるのもっと大きくする必要がある）。

7. む す び

LAN 技術の推移とそこで開発されてきた技術について述べてきた。LAN 技術は一番技術スピードの速い領域の 1 つである。これはとりもなおさず、CPU の高速化と、ネットワークコンピューティングの重要性が大きくなってきたことに起因する。また、インターネットのグローバル化、パーソナル化、マルチメディア化は、その技術の進歩を加速している。今後もさらに LAN 技術は高速化し、さらに、マルチメディア情報を通信品質保証する QOS (Quality of Service) サポートが、半導体技術、プロトコル技術の発展により実現されていくであろう。

〔参 考 文 献〕

- 1) H. Johnson: "Fast Ethernet", Prentice Hall (1996)
- 2) 西田: "TCP/IP インターネットワーキング", ソフトリサーチ社 (1993)
- 3) 西田: "図解 TCP/IP 入門", オーム社 (1994)
- 4) C. Partridge: "Gigabit Networking", Addison-Wesley (邦訳「ギガビットネットワーク」ソフトバンク社) (1995)

〔情 報 入 手 先〕

- 1) IEEE Standard Department. 1996 "802.3v (100BASE-T2) Draft Supplement to 1993 version of ANSI/IEEE Std. 802.3." Piscataway, NJ.
- 2) IEEE Standard Department. 1996 "802.3x (Full-Duplex/Flow Control) Draft Supplement to 1993 version of ANSI/IEEE Std. 802.3." Piscataway, NJ.
- 3) IEEE Standard Document FTP site, <ftp://stdsbbs.ieee.org/pub/catalog>

にしだ なげし 西田 竹志 1982 年、大阪大学基礎工学部情報修士課程修了。同年、同大学基礎工学部助手。1987 年、NEC 入社、C & C システム研究所に所属。現在、NEC USA, Inc., C & C リサーチラボに所属。この間、インターネット、LAN 技術、ネットワーク管理技術の研究開発に従事。工学博士。