ローカルネットワークとして注目される Ethernet

東京大学 生産技術研究所 石 塚 満, 安 田 靖 彦
尾 上 守 夫

計算機の進歩と価格の低下は各人に十分な能力を有する計算機を持たせるようになってきた。それとともに、その効率的なネットワーク化の要請も高まっている。ランダムアクセス無線パケット通信の思想を有線に生かし、簡単なローカルネットワーク手法として注目される Xerox 社の Ethernet について紹介する。また、各種の優先機能の付与を試みているわが国の研究についても触れる。

1. ネットワーク化の要請

計算機の発展とその価格の低下は、計算機の使用形態を大きく変えつつあり、オフィスや研究所、工場内では各人が自分の机に計算機を持つ時代になろうとしている。その能力も、ある予想では5年後には現在的大型機 (IBM 370/168) に、10年後には超大型機 (Cray I) に匹敵するようになるといわれている¹⁾。

このような処理機能の分散は、一方では効率的なネットワーク化の要請を高めている。ネットワーク化が必要な目的としては次のような項目が考えられる。

(1) 高級資源の共用

高速あるいは高精度のプリンター、有限要素法や LIPS などに必要な大容量の高速記憶、データベース、文献検索などのための大容量ファイル、高速のアレープロセッサなどは、価格からも使用効率の点からも各個に保有することは困難であって共用したい。従来の TSS ではこれらの資源は中央の大型計算機に集中していたが、ローカルコンピューターネットワークではそれらが分散していて差し支えない。

(2) ファイルの共用

各自のプログラムやデータを融通し合い、さらに、それらを統合化していくチームを組んで大きなソフトウェアシステムを開発する際など特に必要である。

(3) メールボックス

手紙、連絡文書、会合通知などメッセージを単独もしくは複数の宛先に配布する。相手方は端末の起動時に着信リストが出され、必要に応じて内容を読み、取捨し、

保存する。どのような処理をとったかの記録も管理してくれることが望ましい。

(4) 生活情報

時刻、天気予報、在庫や予算使用状況など、業務を遂行していくのに必要な情報への迅速なアクセスもできることが望ましい。

(5) 遠隔保守

分散した多数の個人用計算機の保守はそれ自体大きな問題である。使用していない時間に診断用プログラムを走らせて、故障の発見、予防保守を行う。またいったん故障を発見したときは、保守センターから各種のプログラムを送って遠隔診断を可能にする。

さて、従来も複数の計算機を接続しネットワークを形成することは行われており、実際に多くのネットワークが稼働している。中でも先駆的な役割を果たした全米の大学、研究機関を結ぶ Arpa ネットが有名である²⁾。しかし、従来のネットワーク技術は必ずしもここで意図しているような多数の個人用計算機を接続するのに充分でない。Arpa ネットを例にとると、各ホスト計算機のネットワークへの接続のために IMP (Interface Message Processor) と呼ぶ小型計算機が必要であり、プロトコルもかなり複雑である。

最近話題になっているオフィスオートメーションでも、ワークステーションと呼ばれる処理ユニットの効率的なネットワーク化が重要な目標になっている³⁾⁴⁾。しかし現状では中央計算機に知的 TSS 端末がついた形のものも多く、数十から数百の処理ユニットを効率的にネットワーク化する目的には必ずしも適当でない。

このような状況下で、簡単な接続手法としてデータハイウェイやループネットワークなどが提案されてきた⁵⁾。その中で特に注目されるのが Ethernet である。

"Ethernet Attracting Attention as A Local Computer Network"
by Mitsuru Ishizuka, Yasuhiko Yasuda and Morio Onoe (Institute
of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo)

題目にあるように、ここでローカル（コンピューター）ネットワークと“ローカル”を付しているのはコモンキャリアの提供する回線（日本でいえば電電公社の回線）を使用しないので、その制約を受けることがないという意味合いが強い。制約がないので広帯域回線を使用するのも自由であるし、接続手順であるプロトコルもかなり自由に定められるわけである。電話の構内交換（PBX）に対応していえば、構内データ交換網ということができる。だが電話の場合にはどれもスター状の網形態がとられていたのと異なり、データ網の場合には多様な形態が考えられる。

2. Ethernet とは

Ethernet の思想の起源である Aloha ネットワークについてまず簡単に触れておく。御存知の方も多いと思うが、Aloha ネットはハワイ大学で開発されたランダムアクセス無線パケット通信方式である²⁾。

ハワイ大学ではホノルルの大学本部にある大型コンピューターとオアフ島、カウアイ島、マウイ島に分散する短期大学、研究施設の小型コンピューター、ターミナルを図1のように UHF 帯の無線チャンネルで接続している。この Aloha ネットではターミナル→ホスト間、およびホスト→ターミナル間を区別し別々の帯域を使用しているが、無線によれば元来 n 局間での相互接続が可能である。

Aloha ネットのターミナル→ホストの無線チャンネルを考えると、各ターミナルは送信すべき情報を 1,000 ビット程度のパケットにまとめ、必要なヘッダ情報、誤りチェック符号を付して任意の時刻に発信する。もしこのとき、他のターミナルからの発信がなければホストは正しくパケットを受信し、ACK パケットを返送するので、これによってターミナル側では送信が成功したことを知る。しかし、ほぼ同時刻に他のターミナルからの発信があると、パケット間での衝突が発生し、ホストでは正しく受信されない。このとき各ターミナルでは一定時間待ち、ACK が返送されなかったら衝突が発生したものと判断し、ランダムな遅延時間の後、同一のパケットの再送信を行う。このように Aloha ネットでは衝突の発生により無駄時間が多くなり、計算によれば回線のスループット（有効使用率）は最大でも $1/2e$ 、すなわち 18.4% にしか達しない。

Ethernet は Xerox 社によって開発されたローカルコ

図1 Aloha ネットの接続法

ンピューターネットワークであり、前述の Aloha のランダムアクセス無線パケット通信の思想を有線に適用したものである⁶⁾⁷⁾。基本的には無線部分を有線に置き替えたものと考えて良いが、有線の特性を生かしたプロトコルの変更により、効率の大幅な改善が図られている。

システムは図2に例示するように、1本の同軸ケーブルを双方向伝送に使用する。各処理ユニットは若干の Ethernet 用インタフェース回路と送受信機を付加してこのケーブルに接続され、放送形式でパケットを送信し、また自局宛のアドレスが付されたパケットを取り込む。オフィスや研究所、工場内に1本の同軸ケーブル（伝送速度が低い場合にはペアケーブルでも可能）さえ敷設すれば、ハードウェア的には若干の回路を付加することによって各パーソナルステーションは容易にネットワークに加入できることになる。

Ether とは、かつて宇宙にまんべんなく存在するとされたあのエーテルのことであり、ケーブルをこのエーテルに見立てて命名されている。このように Ethernet はネットワーク自身では何ら制御機能を持たない受動的な伝送媒体であり、制御は各局に完全に分散されている。したがって信頼性も高い。各局の立場は対等であり、接続された任意の局間での通信が可能である。

有線を使用することによる最大の特長はパケットの衝突検出が容易なことである。各局のパケットの送信は図3に示されるような手順に従う。送信要求があると、まず Ether 上に他のパケットが存在するか空きかを調べ、空きでない場合は送信を見合わせる。これは CSMA (Carrier Sense Multiple Access) という技術であり、無線でも可能である。

空きを確認して送信を開始しても、たまたま2局以上

図2 Ethernetの接続形態の例

図3 各局でのパケット送信の制御手順

が同時に送信を開始する場合があります。このときパケットの先頭部で衝突が発生する。Ethernetでは各局は送信中に衝突の検出を続けており、衝突が検出されれば以後送信を続行しても無駄なので、ただちに送信を停止する。この送信中の衝突検出が可能であることが有線の特長なのである。無線の場合は他局からの信号は空間伝搬中に大きな減衰を受けるので、自局の送信波のレベルが高く他の信号をマスクしてしまうので、衝突検出が不可能である。

衝突検出、送信の放棄後、2局が同時に再送信を行うのでは再度衝突を起こすので、ランダムな待ち時間後、

あるいは衝突検出回数に応じて待ち時間を長くとることにより、再衝突の可能性を減少させる。以上のように、空きの検出後の送信、衝突検出時の送信停止によりネットワーク使用の無駄時間はきわめて小となり、容易に95%以上のスループットが達成される⁶⁾⁸⁾。これは無線のAlohaネットに比較すると驚くべき効率である。

3. Xerox社の開発

EthernetはXerox社パロアルト研究センター(PARC)で開発され、すでにXerox社内では日常的に使用されている。Ethernetの研究は1973年頃より開始された。

パロアルト市はサンフランシスコから南へ約80 km、シリコンバレーの北方に位置している。PARCは3階建の建物であり、各階の廊下の天井裏にそれぞれ1本のCATV用低損失用同軸ケーブルが張られている。長さはそれぞれ1階:約720 m, 2階:約530 m, 3階:約330 mである。研究者の個室が多い2階は単独で1つのEthernet, 1階と3階のケーブルはBNCコネクタで接続されており、合わせて1つのEthernetを形成している。接続されている局数は2階が約130, 1, 3階が約30である。

Ethernetの考え方は特定の計算機に限られるものではないが、PARCでは写真1に示すようなAltoと呼ばれる個人用計算機をもっぱら使用している。これは64~256 kの主記憶、2.5 MBの磁気ディスクをもつ16ビットの計算機である⁹⁾。(608点×808行)の縦長の高精細度ディスプレイをもち、A4判の紙面を表現するのに充分である。また通常の鍵盤の他にマウスと呼ばれるカー

写真1 Ethernet のパーソナルステーション "Alto"
(ディスプレイは高解像度ビットマップ型)

写真2 Ethernet のケーブルとの接続部とトランシーバー
(左上部)および Alto とのインタフェース板

ソル操作器が付いており、文書やプログラムの作成、CAD などが対話的に便利に行える。

このような高精細度ディスプレイの制御や Ethernet の送信制御などには高速の処理を必要とするため、Alto は 16 種のタスクに CPU 自身が切替えられる一種の I/O 計算機のような構成になっている。各タスクはマイクロプログラムで形成され、書替も可能である。標準の Alto には磁気ディスク制御 (2 タスク)、ディスプレイおよびカーソル制御 (4 タスク)、Ethernet 制御 (1 タスク) があり、ユーザーのためには BCPL, Mesa, Smalltalk などの言語に対するエミュレーターがある⁹⁾。LIPS もあるが、これは遅いので同じ Ethernet 中の PDP を呼び出して使用しているようである。

写真2は Ethernet 用のインタフェース板とケーブルとの接続部とトランシーバーである。各自の計算機にハードウェア的にはこれだけ付加すれば、ネットワークに参入できる。ケーブルとの接続には何もケーブルを切断する必要はない。CATV 用のタップを流用し、同軸の外部導体に穴を開け、心線に接続するようにしているだけのものであり、Ethernet を拡張性が優れたものにしていて一要因である。

伝送にはベースバンド信号を使い、速度は 3 Mb/s である。設計としてはケーブル長 1 km、その間に最大 256 局を接続できるようになっている。トランシーバーは写真2にあるようにタップに近接して、したがって天井裏に置かれる。トランシーバーとインタフェース板との間は 5 対のより線で結ばれる。前節で述べた Ethernet の重要な要素である送信中の衝突の検出は、トランシーバー内でハードウェア的に実現されている。またケーブルとの直流的絶縁もここで行っている。

インタフェース板はコンピューターの種類により多少設計が異なり、現在次のようなコンピューター用のインタフェース板が設計されている (Alto, NOVA, PDP-10 & 11, SIGMA, HP-21 MX)。

各自はプリンターを持たないので、数ヶ所に Alto を介したレーザープリンターが置かれ、ハードコピーが必要な場合はそこまで取りに行っている。マルチフォントの使用が可能で通常の印刷物と変らない高品質の出力が得られている。

大容量ファイルも Alto を介して多数の磁気ディスクを接続したファイルサーバーが提供している。PDP-10, NOVA などとも接続されているが、これは LIPS など Alto より高速の処理や演算を要する仕事に当てられている (Alto はハードウェアとしては整数の加減算しかもってない)。

Ethernet 間を接続するために、ゲートウェイコンピューターが置かれる。これにも Alto が使われている。Ethernet は PARC だけでなく、すでに Xerox 社内の各所に建設され、図4のように接続されている。PARC 内の 2 つの Ethernet を結ぶゲートウェイは Porrola という愛称で呼ばれ、ATT の回線を通してニューヨーク州ロチェスターの本社の Ethernet をはじめ、各所と接続されている。加えて Arpa ネットとも接続されている。PARC と道を隔てたところに建つ管理棟の Ethernet との間を結ぶゲートウェイには無線設備も設置され、2 マイル程離れた研究施設の Ethernet と無線で接続することが試みられている。これは Radionet あるいは PRNet (Packet Radio Net.) と呼ばれている¹⁰⁾。ゲートウェイコンピューターは各局の位置を示すアドレス表をもち、パケットのルートを決定する役割を果たす。

このような異種のネットワーク間の接続にはプロトコルの標準化が大切である。Xerox 社では PUP というパケットの標準形式を提案している¹¹⁾。図5はその構成と各ネットワークへの適合を示したものである。PUP は標準のプロトコルとして IEEE 規格にする動きもあるようである。

Xerox 社は Ethernet は市販するが、Alto を市販す

図 4 Xerox 社の Ethernet 間の接続

図 5 異種ネットワーク間接続時のパケットの構成例 (PUP) (数字はバイト数)

る考えはないようである。しかし、Ethernet の普及のため、MIT、スタンフォード大学、カーネギ・メロン大学にレーザープリンター付きで寄付している。

4. 優先機能の実現

ローカルコンピューターネットワークとしての Ethernet の有用性に着目して、わが国でも研究が始められた。わが国の研究はいずれも Ethernet のパケットに優先権を与え、ネットワークの応答性の向上や自律的制御機能を付与することに向けられている。

慶大工学部では ACK 以外のパケットには、空きの検出から送信までの間に待ち時間を設けることにより

ACK パケットを優先させ、応答時間および実効転送効率を向上させる Acknowledging Ethernet を開発している^{12)~14)}。東大生研では衝突検出が容易なことを積極的に利用し、緊急度、重要度の高いパケットを優先させることにより、特に混雑時の効率向上を図る Priority Ethernet を開発している^{15)~18)}。早大理工学部では、デジタル内音声のような即時性が要求される連続的なデータも混在させることを目的として、事前に使用するタイムスロットの予約をとる Reservation Ethernet を提案し、試作を行っている¹⁹⁾²⁰⁾。ただしこの場合にはランダムアクセス

ではなくなること、Ether ケーブルが完全に受動的な伝送媒体ではなくなる点で、本来の Ethernet の思想からはなれている。

以下には東大生研の Priority Ethernet について概要を紹介する。前述のように Ethernet はネットワーク自身では何ら制御機能を持たない受動的な伝送媒体である。ネットワークが空きになったとき、2局以上では同時に送信が開始されると衝突が発生し、いずれの送信も停止される。この点ですべて平等である。Priority Ethernet ではパケットの緊急度、重要度に応じて優先権を与え、衝突時には優先度の高いパケットに道を譲るようにしたものである。この優先権の付与により、各局がその機能に応じて共用のネットワークを自分のものとして能動的に使用する幅を拡大したものである。

優先権の付与はパケットの先頭に優先権用のプリアンブル (priority preamble) のビットパターンを付加し、この期間での衝突検出によっては送信放棄はせず、衝突の相手局の送信を断念させることによって実現する。図 6 はパケットの構成を示しており、先頭から 2 番目のプリアンブルビットはビット同期用、SYNC はヘッダー解読用の同期パターンである。優先権用プリアンブルの長さは優先度按比例して決められる。衝突が発生しても最も長い優先権用プリアンブルをもつパケットのみが生き残り、伝送路が確保される。

図 7 はこの様子を示しており、優先度最低位のレベル 0 は優先権用のプリアンブルなしである。ネットワーク内の最大伝送遅延を $D_{\max}$ 、ビットレートを R 、 $B_d = D_{\max} R$ [ビット] とし、インタフェースでの衝突検出から送信停止までの処理時間を無視すると、レベル 1 の優

図 6 Priority Ethernet のパケット構成

図 7 Priority Ethernet における優先機能の実現の様子

表 1 priority level の例

priority level	packet type
6	
5	(digital voice)
4	broabcasting
3	ACK or NAK from high-traffic interface
2	ACK, NAK
1	data from high-traffic interface
0	data

先権用プリアンブル長は最低 $2B_d$ ビット、レベル 2 は $4B_d$ ビット……となる。ケーブル長 1 km のとき $D_{\max} \approx 5 \mu s$ であり、 $R=1 \text{ Mb/s}$ のとき $2B_d=10$ ビットとなる。ただし、レベル 2 以上では最初の $2B_d$ ビット間で衝突が生じなかったら、自動的に優先権用プリアンブルを打ち切るようにすれば、不必要に長くなることを防止できる。

表 1 はパケットの種類に応じた優先度の割り振りの例を示している。ACK パケットを優先することにより、パケット正常受信の確認が返送されるのを待つ時間を短縮できる。優先機能を活用して、即時性が要求されるデジタル音声パケットも通せるのではないかと現在検討中である。優先機能がネットワーク全体に能動的に作用することを利用して、自局内のバッファの飽和を予知し優先度を上昇させる、さらに進んで他局のパケットの存在中にも割り込むことなども可能となるが、この場合にはデッドロック状態の回避を図る必要がある。

Priority Ethernet は現在、2 局と擬似妨害局が完成しており、良好な動作が確認されている。

5. む す び

多数の個人用計算機を経済的にネットワーク化する方法として Ethernet を紹介した。Ethernet のローカルコンピュータネットワークとしての特長をあげると次のようになる。

- (1) ネットワーク形態が 1 本のケーブルを媒体とするもので、簡単に設置できる。
- (2) ランダムアクセスが可能であり、接続のための伝送制御手順の思想も簡素である。
- (3) ネットワーク自体は完全に受動的であり、制御は各局に分散されているので、信頼性が高い。
- (4) 新規の参入が容易であり、拡張性が優れている。

今後の課題としては、光ファイバケーブルを使う場合にどのようにするか²¹⁾、広域網（日本では電電公社の新データ網）との有効な接続をいかにして図るかなどであろう。光ファイバの場合には分岐に伴う減衰が大きな問題となっている。

本稿を草する機会を与えられた高木編集幹事、Ethernet の見学を許され貴重な御意見をいただいた PARC の D. Boggs 氏、N. Suzuki 氏に厚く感謝する。また東大生研における Priority Ethernet の研究は大学院生の飯田一郎氏に負うところが多いことを記し、感謝する次第である。

(昭和 55 年 2 月 18 日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) P. Isaacson: Personal Computing: A Little Past and A Lot of Future, 第 1 回マイクロコンピュータ応用国際コンファレンス (1978) 53-62

- 2) N. Abramson and F.F. Kuo ed.: Computer-Communication Network, Prentice-Hall (1973); 猪瀬監訳, コンピュータネットワーク, 産業図書 (1975)
- 3) N. Mokhoff: Office Automation: A Challenge, IEEE Spectrum, 16, 10 (1979) 66-69
- 4) 相磯, 坂村: オフィス・オートメーションの幕明け, bit, 12, 1 (1980) 4-10
- 5) 土谷: ローカルコンピュータネットワーク, 信学誌, 62, 11 (1979) 1310-1316
- 6) R.M. Metcalfe and D. Boggs: Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks, Comm. ACM, 19, 7 (1976) 395-404
- 7) 安田: 情報の分配・収集通信システムについて, 機械学会, 異常検知・故障予測研究分科会資料 (1978.1)
- 8) J.F. Shoch and J.A. Hupp: Performance of an Ethernet Local Network—A Preliminary Report, Local Area Comm. Net. Symp., Boston, May (1979)
- 9) C.P. Thacker, E.M. McCreight, B.W. Lampson, R.F. Sproull and D.R. Boggs: Alto: A Personal Computer, Xerox PARC Report, CS-79-11, Aug. (1979)
- 10) J. Shoch and L. Stewart: Internetwork Experiments with the Bay Area Packet Radio Network, Xerox PARC Report, SSL-79-4, Feb. (1979)
- 11) D. Boggs, J. Shoch, E. Taft and R. Metcalfe: Pup: An Internetwork Architecture, IEEE Trans., COM-28, 1 (1980)
- 12) M. Tokoro and K. Tamaru: Acknowledging Ethernet, COMPCON 77 (1977)
- 13) 田丸, 所: Acknowledging Ethernet System の設計, 信学技報, EC 77-69 (1978)
- 14) 松本, 前田, 隈田, 中川: BEST-I (Buffered Ethernet System model-I) 信学技報, EC 79-10 (1979)
- 15) 尾上, 安田, 石塚: 優先権付ランダム・アクセス有線パケット通信方式—Priority Ethernet, 情処全大, 3A-1 (1978)
- 16) 尾上, 安田, 石塚, 飯田: Ethernet のスループットに関する検討, 信学総合全大, 1443 (1979)
- 17) 尾上, 安田, 石塚, 飯田: Priority 機能をもつ Ethernet の応答特性, 情処全大, 4G-2 (1979)
- 18) 飯田, 石塚, 安田, 尾上: Priority Ethernet の試作, 信学総合全大, 1382 (1980)
- 19) 富永, 姜: Reservation Ether Network の提案とその概要, 信学通信部門全大, 130 (1978) (関連論文が同 131~137 に発表されている)
- 20) 本多, 平野, 上野, 斉藤, 富永, 平出: Reservation Ether Network における電話端末を考慮したハードウェア構成, 情処全大, 4G-3 (1979)
- 21) E.G. Rawson and R.M. Metcalfe: Fibernet: Multimode Optical Fibers for Local Computer Network, IEEE Trans., COM-26, 7 (1978) 983-990

テレビジョン学会誌 6 月号 予定目次

【ふぉーかす】	Ghost	東芝 遠藤敏二
【技術解説】	画像計測におけるデジタル技術の応用	浜松テレビ 倉沢一男
【研究動向】	テレビジョン方式回路の研究動向	電通大 長谷川伸・松下電器 木谷晃夫・東芝 竹村裕夫・NHK 村上敬之助
【技術の話題】	スタジオ内情報システム	東京放送 湯浅 謙
	無線制御によるスタジオ照明	東芝電材 岡田和己・長崎文彦
	民生用音声合成・認識装置	東芝 新田恒雄
	「シルクロード」番組制作——ネガ送像, ビデオ編集, ステレオ音声制作技術——	NHK 小川 武・荻原清邦・松原勝正・小幡伊和男
【新技術のページ】	ダイオードガン方式撮像管	NHK 小楠千早
【論文・資料】	静止画 NTSC 信号のフィールド間補間サブナイキスト標準化方式	日立 阿知葉征彦・石倉和夫
	隣接した中波ラジオ送信空中線の放射特性に関する理論解析	NHK 上中田勝明・青柳公男・斉藤 譲
【これすばんでんす】	U-M V-U 方式による高画質 8 波伝送テレビ共聴システムの開発	三上技術士事務所 三上貞夫
【講座】	半導体応用回路: 電源回路	松下電子 藪 能昌・前田幹夫
【現場だより】	郵政省電波研究所	郵政省 上田義矩
【会議レポート】	ISSCC '80	東芝 原田 望
	CLEOS/ICF '80	日立 有本 昭
	第 58 回 NAB 大会レポート	フジテレビ 清水芳之