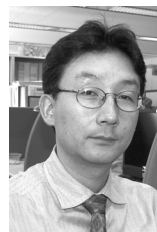


特集②

インターネットルータの技術動向
—次世代通信インフラの整備に向けて—

情報・通信ユニット 藤井 章博



1. はじめに —10 年目の転換期—

現在、ネットワーク技術における変化は、およそ 10 年ごとに現れる転換期の次の波に差しかかっているといえよう。80 年代の中盤は、コンピュータネットワークの一般社会への導入が始まり、大学や企業に LAN の普及が始まった。これが電話を利用した情報通信やオフィスにおける文書管理の形態を劇的に変化させた。90 年代中盤には、光ファイバーを伝送路に利用することが普及し、ATM 通信やギガビットイーサネットとよばれる技術が登場した。これらの技術変化により、1 ビット当りの通信コストが大きく改善された。またこのころ、パソコンの普及があり、その上で動作するインターネットブラウザが情報処理の方法を一変させた¹⁾。

20 世紀に入った現在、インターネットインフラを構成する要素技術が新たな転換期に入っていると

いう見方がある。それは、次のような要因から伺うことができる。

①ユーザトラフィックの増大

ADSL や携帯電話の普及によって、データ通信トラフィック需要が大きく伸びている。今後、マルチメディア利用など高トラフィックが必要な様々なアプリケーションの可能性がある。現状でこの需要の増大が推移すると、数年間の内にインフラの側では劇的な構造変化が不可欠となることが予想される。

②高度で多様なネットワーク管理機能への要求

サービスに応じた通信品質 (QoS: Quality of Service) の確保やネットワークセキュリティ対策など高度なネットワークサービスの提供が求められるようになっていく。インターネットの設計思想

は、「ベストエフォート (最大限の努力)」という考え方にもとづいているが、次世代のインフラの設計には、異なる観点が重要となっている。

③ネットワーク通信機器の新たな研究開発動向

光交換技術の実用化、ネットワークプロセッサの開発、高度な制御機能をもつチップの開発など、ハードウェアの機能の高度化の観点から新たなブレークスルーが求められている。

そこで、本稿では、データ通信のための通信インフラを支えるルータに関する技術動向を解説しつつ、これらの観点を検討する。その上で、こうした転換期に求められている技術政策上の課題を検討する。

2. インターネット通信インフラの概要

インターネットルータに代表される通信インフラに関する技術動向を述べるまえに、多様な要素技術を含むネットワーク関連技術の整理をしておきたい。その上で、通信インフラのこれまでの技術的蓄積の歩みと今後の課題を検討する。

2 - 1

ネットワーク関連技術分類

図表 1 は、ミラノ工科大学の Maurizio Decina 教授の講演資料にもとづく、現在のネットワーク分野研究におけるホットイシューをまとめたものである。注目しているイシューは、この数年以内での実用化

や普及を意識した分野である⁷⁾。

説明のために、これらの要素技術の関係を 2 方向の軸で分類し、図表 2 にまとめる。図の縦軸は、ネットワークの通信プロトコル階層に対応している。上方は、ネットワークを利用したアプリケーションに関連する技術を表し、下方は、交換機器などの設備に関連する技術を現す。また、横軸は、通

信サービス供給者とサービス需要者の軸である。サービス供給者とは、一般にISP（Internet Service Provider：インターネットサービスプロバイダー）と呼ばれている通信事業者のことで、インフラとしては、ネットワークのバックボーンとなる広域接続網やネットワーク管理機能を提供する。また、需要者側には接続サービスを受ける企業や一般家庭の利用者が存在し、インフラとしては、各地域に分散する小規模のネットワークを集約する機器が含まれる。

情報家電や携帯電話などを活用した新しいアプリケーションの開発といったいわゆる「ユビキタス通信」に関連する要素技術は、最もユーザ側に属する要素技術となる。これらの分野は、将来的な拡大が予測され、また、今後の日本の技術の発展が期待される。図では右側の領域に対応する技術分野である。

本稿では、特に、左半分に関する通信インフラ技術に関して、技術的な転換期にあるとの視点に立って述べる。次節以下で、インフラの整備に重要である「ルータ」をネットワークのバックボーンを構成するために必要な「コアルータ」と比較的ユーザ側に近い「エッジルータ」に分けて説明する。

2 - 2

エッジルータとコアルータ

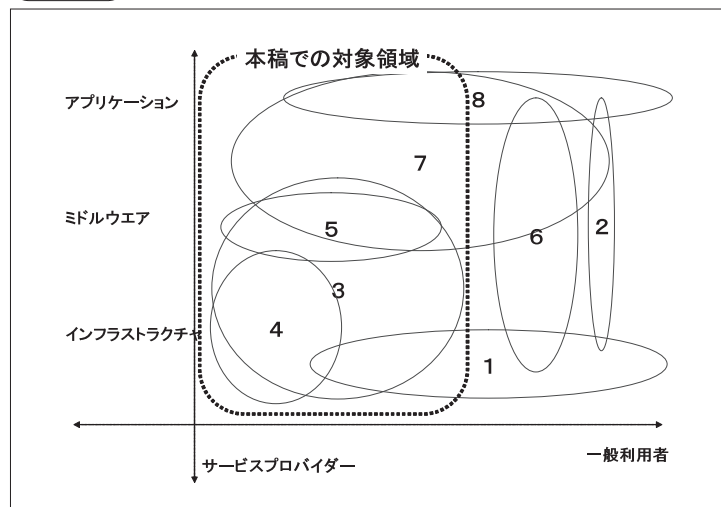
ここでは、インターネットインフラとそれを構成するルータの概略を説明する。ルータの構成は、ルーティング処理や以下に述べるトラフィック制御などの複雑な処理が求められる「エッジルータ」の機能と基幹網に流入する大量のトラフィックを比較的単純な処理によって高速に処理する「コアルータ」の機能に分けられる。これらは、明確に区別されるわけではなく、ネットワークの規模やトラ

図表1 今後重要な研究開発分野

1. ブロードバンドアクセス	・ ケーブル ・ 無線
2. ホーム・パーソナルネットワーク	・ 無線 ・ ウェアラブルな情報機器
3. スイッチ・ルーティング	・ ソフトスイッチ ・ QoS, MPLS, DS ・ IPv6 ・ アクティブネットワーク ・ ピアツウピアネットワーク
4. バックボーンネットワーク	・ IP / ATM / SDH / WDM, GMPLS
5. サービスプラットフォーム	・ オープンサービスアーキテクチャ ・ メッセージング、位置情報提供
6. 移動体通信	・ 第三世代の IP セルラー電話 ・ アドホックネットワーク ・ センサーネットワーク
7. コンテンツ配信	・ ストレージネットワーク
8. セキュリティ	・ ネットワークセキュリティ ・ ユーザセキュリティ

ミラノ工科大学 MaurizioDecina 教授の講演資料にもとづいて科学技術動向研究センターにて作成

図表2 重要な研究開発技術分野の分類



科学技術動向研究センターにて作成

ヒックの性質、設備投資の規模等に依存して様々な形態が存在する。

インターネットの当初の設計思想は、ネットワーク運営の主体となる各組織が独自に構築したネットワークを相互接続するというものであり、通信インフラの発達もこの設計思想に基づいて発達してきた。80年代以前のインターネット接続は、こうした単純な構造で、成り立っていた。しかし、ネットワークの大規模化が進展し、システムは階層構造をもつようになった。それぞれに必要とされる要素技術に、広がりが生ま

れ、それらを総合的に管理する技術も重要となっている。

図表3は、現在の通信インフラを支えるネットワーク通信機器の構成図である。一般的なインターネットへの接続機能は、サービスプロバイダーが提供するこうした機器によって提供されている⁸⁾。

コアルータは、ネットワークのバックボーンにおけるトラフィックを集約する役目を担う。交換能力として、1ポート（物理的な通信回線一対に対応）10Gbpsの交換能力をもつLSIのボードを16基擁し、160Gbps程度の交換能力を

持つ。1基の価格は、1～2億円程度となる。また、エッジルータは、ネットワークの階層としてはコアルータの下部におかれ、より狭い範囲のトラフィックの処理を司る。2.5Gbps程度の交換能力を持つボードを16基もち、その交換能力は20～30Gbpsとなる。1基の価格は数千万円程度となる。

2 - 3

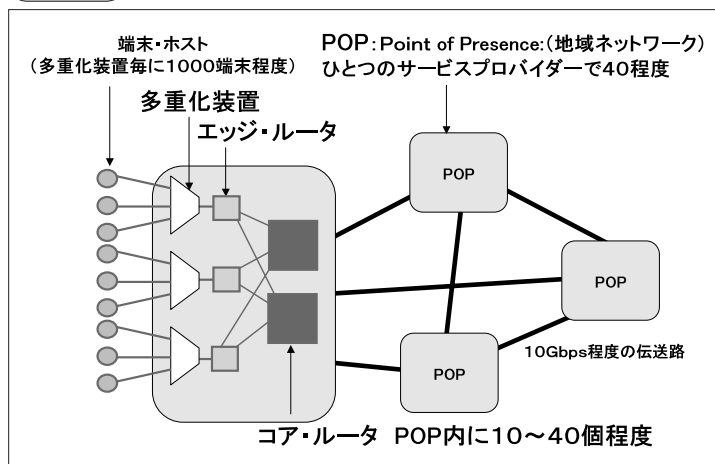
ルータの市場規模と今後の成長

次に、通信インフラを構成する装置産業の規模を見てみよう。米国調査会社（Global Information Inc.）のデータによると、ルータと末端のユーザが利用する小規模なネットワーク機器を合わせたネットワーク機器全体における2002年の世界全体での売上高は、約2兆7千7百億円に達したということである。同社の提供する予測に基づく、2004年には3兆3千億円、2006年に4兆9千1百億円、2008年には、7兆4千7百億円に達するとしている⁶⁾。

ルータ割合は、全体の50%を超え、2002年では、1兆円を大きく超える産業分野である。この割合は、今後ほぼ横ばいで推移すると考えられ、通信インフラを支えるルータの市場規模は3～4年後に全世界で4兆円規模に達すると考えられる。

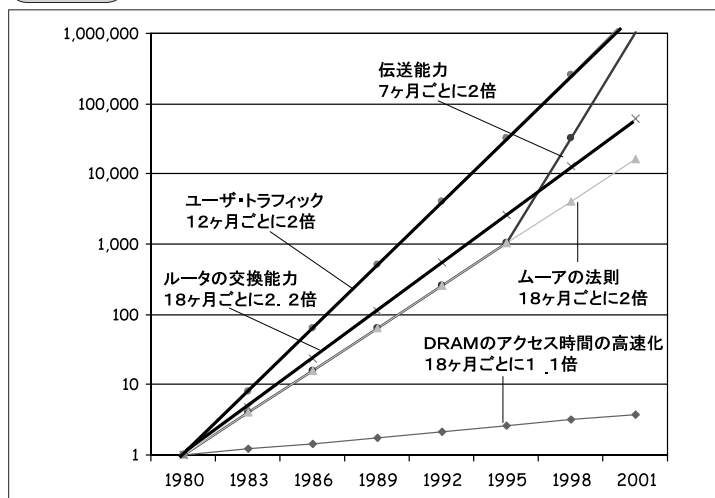
ルータの販売において圧倒的なシェアを誇っているのが、シスコ社である。ネットワーク機器全体売上で2001年に同社が占めたシェアが69%である。2位以下の企業名は、2位スリーコム社（7%）、3位ノーテル社（3%）であり、ちなみに1%以上のシェアをもつ日本企業は無い。

図表3 エッジルータとコアルータ



スタンフォード大学 Nick McKeown 教授の講演資料にもとづいて科学技術動向研究センターにて作成

図表4 トラフィック量の伸びと関連技術の変化



スタンフォード大学 Nick McKeown 教授の講演資料にもとづいて科学技術動向研究センターにて作成

2 - 4

ネットワークトラフィックの増大

こうした、通信インフラを支えるルータ機器に対して、技術開発上の要求は高いのであろうか。半導体の集積度、演算速度は、よく知られるようにムーアの法則にしたがって、指数的にその性能が進歩してきた。一方、ネットワークに流入するトラフィック量は、特に近年、国内でもADSL（Asynchronous Digital Subscriber Line）の一般家庭への普及率が増大し、アクセス回線の速度が、数

Mbpsを超えるようになってきた。また、携帯電話の普及とこれを利用したデータ通信トラフィック需要が大きく伸びている。

図表4は、過去のエレクトロニクスの処理速度の伸び、トラフィック需要の伸び、およびルータの交換能力の伸び等を過去の推移をもとに比較した図である。トラフィック増大の傾向が続き、ルータにおけるトラフィック処理能力が現在の延長で推移すると仮定すると、数年のうちに必要な処理能力は需要の数倍になることになる。これはあくまで予測に過ぎないが、通信アプリケーションへの需要が今後

も活発で、ユーザトラフィックがこれまでのペースで増大すれば、通信インフラを構成する機器の開発において新しいイノベーションが必要となる²⁾。

また、今後のトラフィック量の

伸びは、新しい通信アプリケーションの内容によって、その量と性質が大きく変化するであろう。予想される状況としては、まず、いわゆるマルチメディアトラフィックが増大し、リアルタイムのデジ

タル動画像データの伝送要求が高まる点である。また、情報家電の利用が進展すると、小規模の通信トラフィックを頻繁に送受信することでトラフィックの増大をもたらすことになる。

3. 技術動向

現在のルータ機器類は、「IP スイッチング」とよばれる技術を基礎としている。インターネットを構成する個別のネットワークの境界部分では、情報を伝送するためのコンテナの役目をする「IP パケット」のあて先の処理を行う。電話回線の交換と異なり、このあて先処理は、パケット毎に行われるために時間がかかることが避けられなかった。90年代に登場した「IP スイッチング」は、「カットスルールーティング」と呼ばれる方式で、この問題に対処している。通信機能のハードウェアに近い部分で、同じ論理コネクシオンに所属し、同一あて先向けであるとみなされる一連のパケットにラベル付けを行う。これにより、ルーティング処理を省略するためのことで、あて先処理にかかる時間を短縮する方式である。これによって、高い交換能力が得られるようになった。

しかし、通信機能を、伝送能力と交換能力で分けると、依然として伝送能力が勝っているため、交換能力がボトルネックとなる。これは、伝送路には、光通信技術が

導入されたことに対して、交換機能では、依然としてエレクトロニクスが主流であるからである。

次世代のルータでは、量と質の両面からより高度なルーティング処理機能が要求される。このことは、通信インフラのコアの部分では、より高い伝送能力と交換能力が必要になること、また、エッジ部分では複雑な機能を高速に処理する必要が生まれることを意味する。これにより、双方の機能分化とそれぞれの高度化が進展している。以下では、それぞれの技術的課題を概説する。

3 - 1

コアルータの高速化

光交換技術が実用化にむけて進展しており、コアルータ技術開発の場合は、次世代のネットワーク機器の開発が進行している。伝送路は、光ファイバーを基本として、Tbps オーダーの伝送が可能である。あて先を定める交換処理に関しては、依然としてエレクトロニクス技術が主流である。しかし、

近年のフォトエレクトロニクスの研究・開発の成果を背景として、光交換技術がルータ機器に導入されると考えられる。

3 - 2

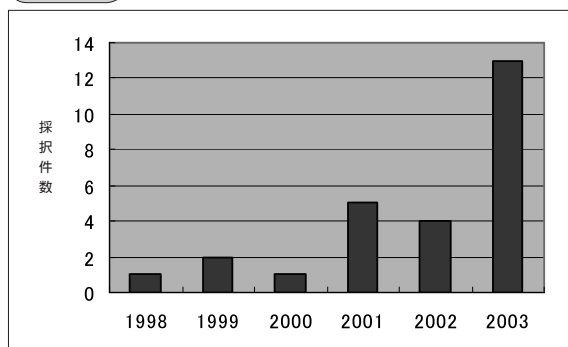
エッジルータの高機能化

エッジルータに求められる機能は、これまで述べてきた状況を背景とし、益々高度化していくことが予想される。そして、この部分に蓄積される技術は、次世代のインターネットを形作る核となる技術であることは間違いない。

図表5は、インターネットプロトコルに関する標準化団体であるIETF (Internet Engineering Task Force) が、近年採択した技術仕様の文書であるRFC (Request for Comment) 数の推移である。MPLS (Multi-protocol Label Switch) は、先に述べたカットスルールーティングによって、多様なパケットの処理を高速に実施する技術である。現在のルータを形作る基本的なアーキテクチャである。この技術に関連する提案が近年活発であることがわかる^{4, 5)}。

MPLS に関する技術提案が盛んであるという状況は、特にエッジルータに関するイノベーションが活発に行われていることを意味している。この背景の一つには、次に述べるようなエッジルータのもつネットワーク管理機能の高度化への要求がある。

図表5 MPLS 関連技術の伸び



参考文献⁵⁾に基づいて科学技術動向研究センターにて作成

3 - 3

研究開発課題

インターネットの設計思想は、「ベストエフォート」型のシステムを構築するというものである。この考え方の背景は、60年代～70年代初頭における、コンピュータネットワークの黎明期に遡る。各組織が独立にネットワークを構築し、それらを相互接続するのが「インター」「ネット（ワーク）」の始まりであった。インフラを構成するルータ機器は、ベストエフォート型の技術を集約するものとして発達してきたと言える。これに対立する思想は、国家がインフラとしての電話交換網や電気・水道を普及させる際の考え方であり、全ての利用者に一定の質のサービスを平等に提供するというものである。

以下では、研究開発が新しい局面を迎えている点を説明する。すなわち、ネットワーク管理機能の充実には、従来のインターネットの設計思想を超える発想が求められているということである。

(1) トラヒック品質制御

まず、ベストエフォート型のネットワークでは、個別の通信サー

ビスに応じた通信帯域の保障が困難な点が研究開発における一つの鍵である。帯域保障機能の重要性は、90年代以降、技術的な検討課題として盛んに議論されてきた。これは、広帯域のデジタル動画伝送を伴うマルチメディアアプリケーションが普及しなかったこともあり、問題とはならなかった。しかし、一般家庭にも100Mbps程度の回線容量が確保されつつある現在、通信アプリケーションがこの回線の可能性を引き出すためには、技術変化の方向を決定する大きな要因として帯域保障技術が必要となる。この技術は、個別の通信コネクションの間で、通信のQoSを保障することであり、これを実現するためには、ネットワーク機器全体に渡るトラヒック量の管理制御が必要となる。この機能は、特定の通信事業者だけでは実現が困難で、通信インフラを運用する複数の組織間で高度な情報交換と制御を実行する必要がある。

(2) ネットワーク管理制御

ベストエフォートという考え方は、ネットワークの管理制御を「分散型」に実施するという方向性を生み出す。このような設計思想は、通信インフラとしてのインターネットを短期間に発達させ、普及す

るのに役立った。しかし、最近特に重要性が指摘されているセキュリティ対策の点からは、分散型の監視制御は脆弱である。

例えば、ウイルスなどによって不正なトラヒックが発生し、DoS (Denial of Service: サービス低下) 攻撃が起こった場合には、ネットワークを構成する分散的な「エリア」と呼ばれる境界線を越えて、不正な操作の追尾を行わなければならない。こうした制御機能は、次世代のエッジルータにおける重要な機能と認識されており、攻撃の予防、発生時の対応、その後の追尾機能など、どの段階においても、複数の運用管理組織が関与する制御機能を実装しなければならない。

この例で顕著のように、今後の通信インフラの進化にとっては、これまでインターネットの発展を支えてきた「ベストエフォート」という考え方だけでは不十分である。このことは、別な見方をすれば、データ通信のインフラとなったインターネット基盤技術において、日本の技術が大きく貢献するための好機であるとみなすこともできる。以下では、このような立場に立って、技術政策を検討する。

4. 技術進化のイニシアティブ

4 - 1

電話交換網の時代

電話交換網という通信インフラを整備する時代には、電々公社の研究所をはじめとするファミリー企業の中央研究所がわが国の通信インフラに関する技術的成長を牽引してきた。技術的蓄積は、大規模通信事業者が年次計画に従った設備投資を実施するなかで培われてきた。数年後の「デジュール」

標準を企画し開発する過程で、計画的な技術的蓄積が実践されていたのである。これは、日本に限らず世界中の通信インフラに関して行われてきたことである。高等教育機関からの人材供給という観点でいえば、高専や大学の通信工学科卒業生にとって人気の進路は、電々公社やその「ファミリー」と呼ばれる企業で占められてきた。この事実、こうした構造が従来からうまく機能してきたことの一端を表している。

4 - 2

インターネットの時代

その後、インターネットの発展の時代には、こうした技術的成長のあり方に変化がうまれた。技術の進化を牽引してきたのは、新しい機能を備えた製品を市場へ早く投入するという「デファクト標準」の獲得を目指す企業であった。その端的な例として、米国のシスコ社の戦略を見てみよう。同社は、

先端技術保有ベンチャー企業を買収することにより、同社の技術的蓄積を実現してきたという側面がある。このような手法が可能でありまた強い競争力を持ちえたのは、インターネットの設計思想が「ベストエフォート型」であったことと無縁ではない。なぜならば、ネットワークを構成するのは、個別の企業や大学であり、彼らは自分たちにとって有効な機能を備えた製品が現れたとき、それをいち早く自分たちの通信インフラに利用できた。結果的に、この分野の研究開発を牽引するのが、国策企業的な大規模通信事業者ではなく、シスコ社を中心とす

るシリコンバレーのベンチャー企業になっていった³⁾。

4 - 3

次世代の研究開発のあり方

NTTは依然として、通信機器を製造する企業の研究開発の中心的役割を担っている。多くの優秀な人材を抱え、相当額の研究費を投下しているのは変わらない。しかし、民間企業である以上、前節で述べたような環境の変化に対して、国家戦略という視点に立ったイニシアティブをもはや明示的には取れなくなっている。また、通信機器を製造するわが国のその

他の企業では、概ね中央研究所を縮小する傾向にある。また、データ通信事業に参入する新興企業には、通信インフラの長期的な成長のために研究開発にも投資するという視点はあまり無いように見受けられる。

これまで本稿で述べてきたように、技術の観点からは転換期にあり、その技術は従来の「ベストエフォート」という設計思想の枠を超えた技術開発が求められている。だとすれば、インターネットの今後の発達のために、これまでとは異なる技術進化のイニシアティブを取らなければならない。

5. 技術政策上の課題と提案

電話網の時代には、国策企業の役割が重要でかつ明確であった。通信事業者が民間企業である現在、国に期待される役割は、次世代の通信インフラに関する研究開発のあり方についての明確な指針を示し、基礎的研究を推進することである。通信事業者はビジネスの原理に従って事業を展開する。それに伴った研究開発も当然行われるであろう。しかし、今後この分野で、長期的な視点から基礎的研究を持続的に実施する機能は、大学が担う必要がある。国は、戦略に基づいて大学がどのようなリーダーシップを発揮し、この分野の関連する企業とどのような連携を行うべきか明確にする必要がある。具体的には、次に述べるような具体的な方策を検討すべきである。

5 - 1

標準化への寄与

3 - 2で触れたデファクト標準であるRFCの採択は、組織的な対応の有無よりも、個人のこれまでの標準化過程へ寄与やIETFに

おける発言力によるところが大きい。国内にも、そうした検討の場で、一定の注目度を集める大学研究者も存在する。しかし、日本の産業規模からするとそうした実力を備えた人材の数は限られている。まず、国内の大学から国際標準への寄与できるような研究を行うべきであり、そのような活動を積極的に支援し、評価する体制を作るべきである。

5 - 2

独自のビジョンの策定

現在のインターネットの標準が決定される過程は、オープンといながらも、ヴィジョンを共有し現行のインターネットの創設に貢献した限られた人物らによって強く方向付けられているという。技術の将来像として、これまで蓄積されたインターネットのテクノロジーが、今後もデータ通信技術の基盤であるという構図には根本的な変化は無いであろう。しかし、その基盤の上に、国の通信インフラを今後どのように発展させていくのかというわが国独自のヴィジ

ョンが必要である。

5 - 3

研究活動のあり方

次世代のネットワーク管理に重要とされるネットワークプロセッサの開発には、ルータの設計技術に関する実務的な知識に加えて、並列処理などの分野における基礎研究が必要である。この分野で実践的価値の高い研究成果を生み出すためには、実務経験のある若手研究者を大学に取り入れることが重要である。近年、海外の大学では、ベンダーあるいは通信事業者の研究機関での経験を有する人物が多く活躍している。特にアジアの大学にこの傾向があり、国際会議での発表件数や質が劇的に向上しているという。国内の大学でも積極的な人材の登用が必要である。

ネットワーク管理技術に関する研究開発の成果は、例えば、制御ロジックを組み込んだASIC（アプリケーションを指向するチップ）の形で具体化する必要がある。大学で実施された研究成果が、こ

のような形で製品化でき、通信機器の部品市場で競争力を持つことが必要である。こうした研究成果をもたらすためには、トラヒック理論などの基礎研究が不可欠であり、大学の役割は重要である。

参考文献

- 1) Janet Abbate, "Inventing the Internet", MIT Press, 1999
- 2) David C. Mowery (2002) "Is the Internet a US Invention? - an Economic and Technological History of Computer Networking", Research Policy, 31 (2002), 1369 - 1387.
- 3) 本荘修二、校條浩 (1999) ; 成長を想像する経営—シスコシステムズ・爆発的成長力の秘密—、ダイヤモンド社
- 4) 藤井章博、玄場公規「ネットワークデファクトスタンダード」宮城大学紀要、2001 年
- 5) <http://www.rfc-editor.org/rfc.html>
- 6) <http://www.gii.co.jp/>
- 7) <http://web.cefiel.it/~decina/>
- 8) <http://www.stanford.edu/~nickm/>

.....