

Ⅱ. 報告論文

情報通信技術の動向と将来展望

大 石 進 一

1. はじめに
2. 情報通信技術とは
3. 21世紀に向けての情報通信技術のトレンド
4. 情報通信技術の基礎研究と技術革新
5. 情報通信技術に限界はあるか
6. 日米の技術比較
7. おわりに

1. はじめに

情報通信技術は近年高度に発展を遂げている。その結果、極めて多様な理論、技術、システムが共存しており、その様相は極めて複雑である。ここでは、このような情報通信技術の現状と将来展望について、この分野の基礎研究に携わっている一研究者の目から整理した結果について報告する。

情報通信技術は情報の技術、通信の技術、そして、それらの複合した情報通信の技術の総体と見なすことができる。情報、及びその伝達、処理は人間生活の1つの基礎を与えるものであるから、情報通信技術は社会の1つのインフラを提供しつつある。また、一方で、計算理論、情報理論や人工知能理論に代表される情報通信技術の基礎を支える理論の提供する方法が、例えば、金融研究の方法にも影響を与え得る可能性なども考えられる。そこで、ここでは通常よく用いられる「ハードウ

エア」と「ソフトウェア」というような切り口に「基礎理論」という視点を加えた議論を展開する。現在、数メートル四方にぎっしりと書き込まれたレイアウト図に従って、数ミリの角の VLSI (Very Large Scale Integrated circuit) が作られている。ここには、VLSI の製造を可能にする物理に基づく製造技術と CAD (Computer Aided Design) と呼ばれる VLSI 設計のためのソフトウェア技術が存在する。のみならず、VLSI でどのようなものを作ればよいかという、数学などに基づく人工知能理論やニューラル・ネット理論などの基礎理論の存在も本質的なのである。

本論文の構成は以下の通りである。2. では、情報通信技術とは何かについて、幾つかの切り口を示し、技術発展段階の現状認識について簡単に論じる。3. では、情報通信技術の発展のトレンドについて概観する。4. では、情報通信革命を支える基礎研究について概観し、その役割について論じる。5. では、

この様に既に高度に発達した情報通信技術に限界があるのか否かについて論じる。また、6.では、日米の技術比較について著者の個人的な見解を述べる。

2. 情報通信技術とは

情報通信に係わる技術は現在高度に発展してきている。その結果、多様な理論、技術、システムが存在しており、極めて複雑な様相を呈している。ここでは、「ハードウェア」、「ソフトウェア」、「基礎理論」及び「社会性」という切り口と「アナログ技術」と「デジタル技術」という切り口から情報通信技術とは何かを考察する。

また、情報通信技術の発展段階の現状認識について述べる。

(1) 情報通信システムの定義

情報通信技術は情報を扱うシステムを構築する技術である。システムを構築するためには、当然そのシステムを構成する物理的な材料が必要となる。これは、情報通信システムを構築する際の物理的な制約の存在を意味する。これをハードウェアと呼ぶことにしよう。このようなハードウェア上で、情報を扱うシステムを構築する訳であるが、情報というのは極めて多義で、情報通信システムを真っ向から定義するのは極めて難しい。そこで、極めて広く情報通信システムをつぎのように定義しておこう。

定義 (情報通信システム)

時空間のある地点での影響を時空間の他の地点に伝える物理的なシステムのこと。

この定義において時空間のある地点というのは、特定の時間と場所という意味である。場所にあまり重点をおかず、時間的に影響を

伝えていくのが、情報処理で、異なった場所に影響を伝えるのを主眼とするのが、通信であるといえよう。また、ハードウェアを使ってこのような仕組みを実現するのがソフトウェアである。また、どのような仕組みにするかを与えるのが基礎理論である。

(2) アナログ技術とデジタル技術

情報通信処理の仕組みを考える上でのもう1つの切り口はいわゆる「アナログ」と「デジタル」という視点である。アナログというのは、自然現象そのもののことで、元来すべてのハードウェアはアナログ値を取る。しかし、自然界に存在する揺らぎなどの影響を考え、マージンを取って、有限個の要素と自然現象を対応させるのが、デジタルの思想である。例えば、ある素子の両端の電位差が正であれば1を、負であれば0を対応させるのが、2値デジタル化である。デジタル技術はVLSIの発展などに支えられて高度に発展したため、デジタル化をせず、アナログ値をそのまま用いる技術を、アナログ技術と呼ぶようになった。情報通信システムを構築する際、アナログ系では、ハードウェアの特性が直接にシステム実現の仕方に影響を与える。従って、この場合の基礎理論には物理的理論が大きな役割を果たす。一方、デジタル系では、一旦、その系でデジタル回路を組むのに必要な演算方式を確立してしまえば、後は、アルゴリズム論で可能とされる処理をすべて原理的には実現できる。従って、システム構築に関し、物理的な制約の影響は後退し、数学的な理論が基礎理論として浮上してくる。現在、情報通信システムのデジタル化が進むにつれて、数学的な基礎理論が益々重要となってきた理由の一端がここにある。VLSI技術

II. 報告論文

を使えば、ほとんどのアルゴリズムは原理的には VLSI 上にハードウェア化される程に VLSI 技術の進展は著しいのである。

(3) 情報通信システムの社会性

さて、このように情報通信システム技術が進展しても、その産業化を考える際には、更にいろいろな制約が現れる。すなわち、情報通信システムを製造するには、多額のコストがかかることが多い。従って、例えば、VLSI を製造するか否かはその VLSI がどれ程の需要をもっているかによって決まることが多いのである。これは情報通信システムの社会性といってもよい性質であろう。ここで、少し原点に立ち返って言えば、どのような情報通信システムを構築することが人類に貢献するかという意味での深い社会性が問われているともいえよう。

(4) 情報通信技術の現状の認識

本文では情報通信技術の将来像と現状の認識について論じていく訳であるが、結論めいたことを先に述べるならば、情報通信技術はようやく成人を迎え、何々ができるようになったという段階から、サービス指向型の技術開発への転換が行われているというのが大方の現状の認識であろう（寺田 [1990]）。また、上に述べてきたこととの関連でいえば、基礎に立ち返った本質的な議論をもとに、新しい情報通信技術が開発されるのであり、応用に従事する場合でも基礎的な面に対する深い理解が必要となっているといえよう。

3. 21世紀に向けての情報通信技術のトレンド

金融産業は情報産業と見なしてもよいほ

ど、金融産業にとって情報通信システムはインフラストラクチャとなっている。例えば、銀行の勘定系オンライン化や、EFT (Electronic Fund Transfer) やオンライン提携ネットワークである全国キャッシュサービス (MICS) や日銀ネットなどである。

ここでは、情報通信システム技術の発展の動向について、金融にインパクトのありそうな技術を中心として概観する。

(1) デバイス技術——量子力学革命

情報通信技術革新を引き起こした最も大きな要因を1つだけ挙げよといわれれば、1900年代前半の量子力学の発見を挙げることになる。Maxwell の電磁気学が前世紀に確立され、1895年には Marconi による無線電信実験も行われて、無線通信技術は着実にスタートを切っていた。しかし、1948年の Shockley によるトランジスタの発明は量子力学に基づくものであり、これから固体エレクトロニクスがスタートした1948年という年は、情報理論やニューラル・ネットワーク理論、そして最初のコンピュータである ENIAC やオートマトンの理論などの発表の時期と近接している。トランジスタは VLSI 技術に繋がるもので、その意味で量子力学は情報通信革新の支柱となったと考えられる。

イ. 半導体技術

メモリなど半導体集積回路の集積度は3年間で4倍というペースで増大している。1988年に4MbitDRAM が現れ、1991年には16MbitDRAM が1994年には64MbitDRAM が現れるものと予想されている。しかし、このようなメモリを開発するには線幅が $0.3 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の微細加工技術が必要となる。このような微細加工技術として、高速

に円運動する電子が出すX線を利用するSOR (Synchrotron Orbit Radiation) 技術の研究が進められている。この技術が完成すれば、GbitDRAM も産業化されると予測されている。このように半導体技術は高度に発達しているため、今後様々な限界にぶつかる可能性がある。例えば、集積回路から出る熱をどう処理するかという問題がある。これに対しては、計算過程が可逆となる演算素子を用いて、発熱をさせない方式なども理論的には考えられている。人間の脳が熱くならないで計算するのと同じ原理を用いようとするものである。実際にこのような発想が活かされるかどうかは、必ずしも明らかではないが、新しいブレークスルーによって様々な限界が克服される可能性の高いことが予想される。

ここではそのような一例として、量子効果デバイスの発展について簡単に触れることにしたい(電子情報通信学会誌[1989a])。量子効果デバイスは電子の量子力学的特性長、例えば位相のコヒーレンス長や平均自由行程以下に量子井戸のサイズを小さくすると、電子の波動性が現れ、新しいタイプのデバイスができるというものである。特性長としては 0.1nm ～数 μm のものがあり、このサイズ以下に薄膜を成長させたり、超微細加工する必要がある。このような量子効果デバイスにより、半導体材料として、人工的な新しい多くの材料が得られるようになってきており、よい特性をもったデバイスが多く造られるであろうことが期待さ

れている。¹⁾

このように、既に、高度に発達した半導体技術であるが、新しい発想によって益々急速に技術が進展していくことが予想される。

ロ. 超伝導エレクトロニクス技術

超伝導エレクトロニクス技術は21世紀を睨んで大変魅力的な技術である。ジョセフソン素子に匹敵するような3端子デバイスなどが開発されれば、超伝導スーパーコンピュータなども実現されよう。いずれにせよ、実用化は今世紀末か来世紀であると予想される。

(2) 光通信技術 (電子情報通信学会誌 [1989b])

イ. 光通信技術の将来展望

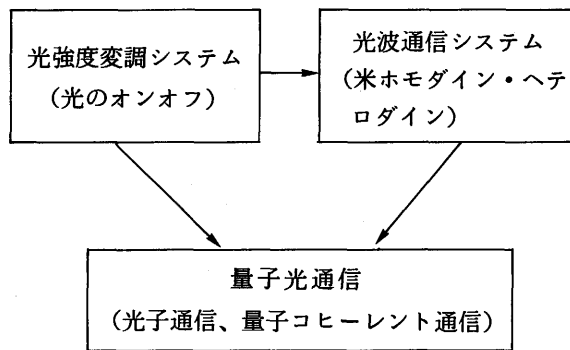
一方、1960年にルビーレーザーが発明され、1962年に半導体レーザー、1970年には低損失石英ファイバの発明と続き、光通信の役者がそろった。レーザーも量子力学効果によるものである(第1図)。その後、半導体レーザーを用いた光ファイバ通信技術の開発が活発に進められた。その結果、日本の公衆通信においては次のような光ファイバ通信システムが実用化されている。

- ・ 1981年 32Mbit/s 光ファイバ通信システム、
100Mbit/s 光ファイバ通信システム
- ・ 1984年 400Mbit/s 光ファイバ通信システム

1) 電子の波動関数が捕まるような井戸型のポテンシャルのことをいう。量子力学の教科書には必ず量子井戸の例題が出されている。それを見て、江崎博士が量子井戸を人工的に造ろうとアイデアを出したのがこの分野の始まり。

Ⅱ. 報告論文

第1図 光通信システム



・1987年 1Gbit/s 光ファイバ通信システム。

これらの光ファイバ通信では、情報は光のオン・オフを用いた極めて原始的な方法で伝えられる。すなわち、船と船とがサーチライトで通信するのを光の空間伝搬ではなく光ファイバという有線を用いて行っているのである。これはレーザ光の制御が難しいためであるが、光のコヒーレンシー²⁾をよくして、光を波として扱い、その振幅や位相に情報を乗せるという、コヒーレント波動通信技術を用いる研究も進められている。これは光波ファイバ通信と呼ばれるものである。

光ファイバ通信の特長は大容量無中継通信が可能であることである。光のオン・オフファイバ通信でも光波ファイバ通信でも無中継で通信できる距離的な限界は数100kmから1000km弱である。一方、通信容量はオン・オフ通信では波形が伝送途中で

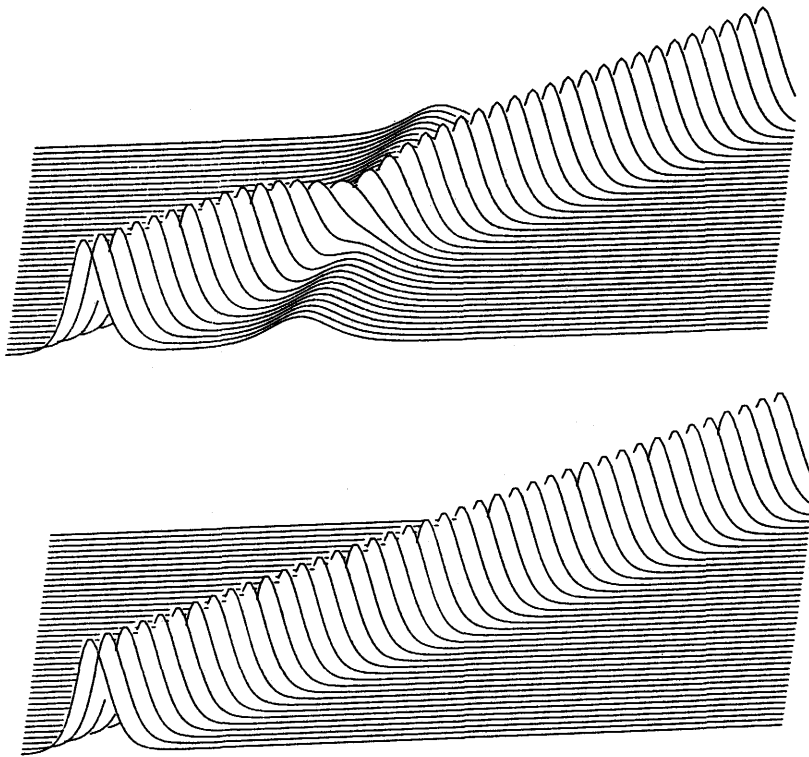
歪んで広がってしまうために、10Gbit/s程度が限界である。しかし、光波ファイバ通信方式では、波形歪みを修正できるので（これを等化という）100Gbit/s程度までは可能である。また、波形の広がりを非線形効果による波形の突っ立ちの効果と釣り合わせる光ソリトンファイバ伝送³⁾も、エルビウムドープ・ファイバなどを用いた光増幅技術の進展により実用化の見通しが立ちつつある。この方式では、無中継で光ソリトン伝送できる距離は数10kmであるが、エルビウムドープ・ファイバ増幅器を挟むことによって波形等化を行うことなく数1000kmに亘る光ソリトン伝送が可能である。近い将来には数10Gbit/s、原理的には数100Gbit/sの伝送速度をもたせることが可能であると見られている。

光ファイバの低損失域の1.5~1.6 μm には原理的には帯域幅12.5THzあり、数Tera bit/sの情報に乗せることができる。

2) フォトンが集まって光の波ができるが、その位相がよくそろっている度合をいう。

3) 非線形性の効果によって光ソリトン（第2図）という安定なパルス波が光ファイバ中を伝搬する。これを利用したファイバ通信方式。

第2図 ソリトン



光の量子状態を利用した光量子通信の研究も精力的に進められている。

さらに、フェムト (10^{-15}) 秒という超短光パルスの生成技術の研究も進んでいる。

そして、これらの成果を踏まえて超高速・超並列光エレクトロニクスの研究も集中的に行われようとしている。

ロ. 光情報処理技術

光情報処理技術の研究としては、光コンピュータや光信号処理・光交換機などの研究がある (第3図)。

光の高速性・並列性を利用して、新しいコンピュータ・システムを構築しようとする方向は極めて魅力的である。すなわち、

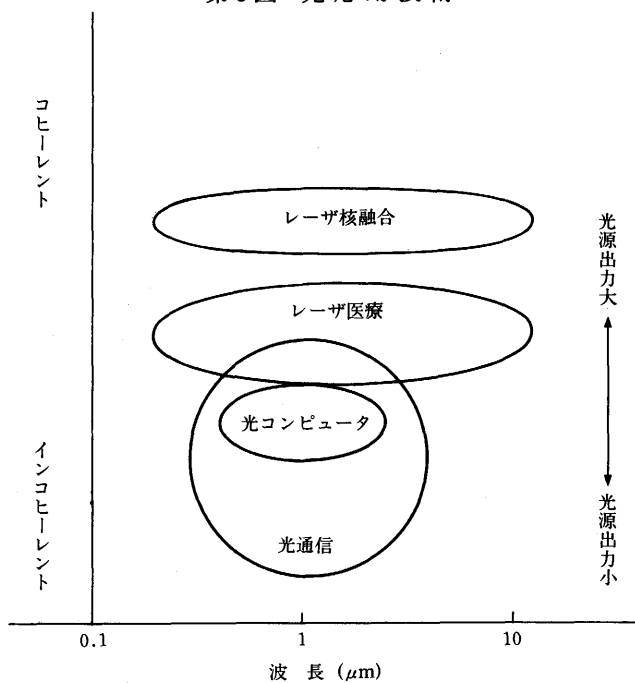
半導体技術を用いた場合、スーパーコンピュータの演算速度は 10^{-9} sec/operation 程度が最高速であり、超並列計算機でも 10^5 台並列程度が最集積であるが、光コンピュータが実現した場合、演算速度は 10^{-12} sec/operation 程度、並列度は 10^{10} 程度になるという試算がある。この並列度は脳のニューロン数に近くなる (第4図)。

現状では、まだ、アイデア段階のものが多く、今後の研究に大きな期待が寄せられている。

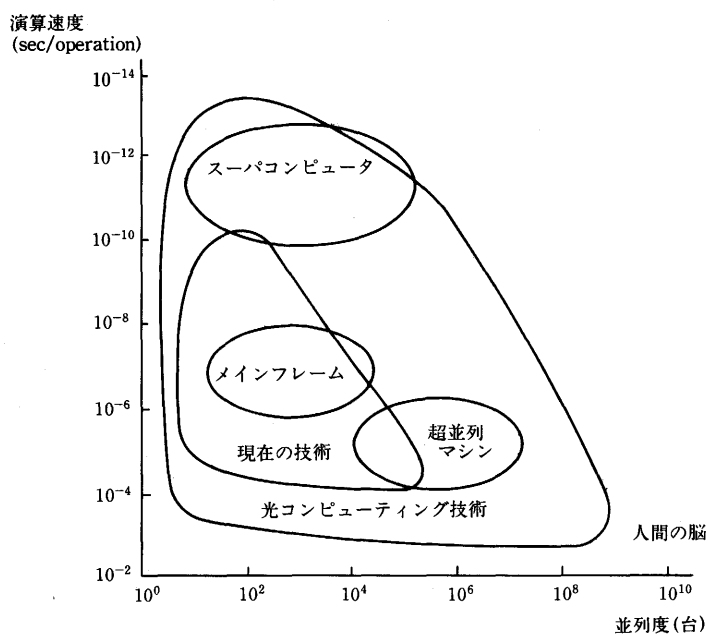
光信号処理においても同様な現状である。小容量の空間分割光交換機は実用化に近づきつつあるが、性能的な面ではまだ、エレクトロニクス技術を超えられないでい

Ⅱ. 報告論文

第3図 光応用技術



第4図 光コンピューティングの位置付け



る。しかし、地道な研究によりブレークスルーが出れば、大きな可能性を秘める魅力的な研究分野である。

(3) 衛星通信技術 (電子情報通信学会誌 [1989c])

衛星による通信が初めて行われたのは1960年のエコー1号通信衛星を利用したものであった。以来、衛星通信は大きな発展を遂げて今日に至っている。衛星通信には、

- ・ 広い範囲との通信が可能
- ・ 必要に応じて素早く通信回線を作れる
- ・ 同時に多くの箇所に情報を送れる
- ・ 衛星が見えるところからならば同時に多くの箇所から衛星にアクセスすることができる
- ・ 地震や台風などの災害に強い

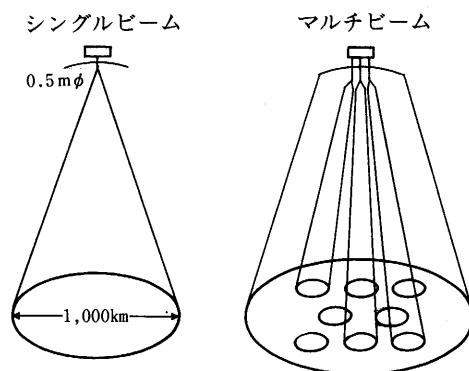
などの特長をもっている。これらを活かして、国際通信、国内長距離通信、専用網、非常災害時通信を中心として利用されてきたが、

- ・ 高速デジタル専用網
- ・ 地上デジタル網との統合網
- ・ VSAT (Very Small Aperture Terminal; 超小型地球局) を用いた専用網
- ・ 移動体衛星通信サービス

など、適用範囲の拡大が進められている。金融産業との関連でいえば、災害時における通信ネットワークの確保、離島などとの網の接続はもとより、国際テレコンファレンスなどの用途が考えられる。

衛星通信サービスを行っている国は、アメリカ、ソ連、日本を初めとして多数ある。日本では1983年にCS-2a,bが打ち上げられ、商用衛星通信サービスが開始され、NTT、政府機関、JR、電力会社などが使用してきた。1988年にはCS-3a,bがCS-2の後継機として

第5図 衛星通信方式



打ち上げられ、同様の機関が使用している。また、1989年には民間通信衛星JCSAT衛星やSCC衛星が打ち上げられた。

国際衛星通信サービスとしては1964年に国際電気通信衛星機構 (INTELSAT) が発足し、1965年に打ち上げられた1号衛星以後10数個の衛星が大西洋・インド洋・太平洋に打ち上げられており、世界のほとんどすべての国にTV・電話・データなどのサービスが行われている。

また、1982年より国際海事衛星機構 (INMARSAT) は船舶局に対して、遭難通信や電話・テレックスサービスなどを行っている。

衛星の大きさも10年前の1トン級のものから、最近では2トン級のものに移行し、シングルビーム通信方式からマルチビーム方式 (第5図) に移行することによって、地上アンテナの小型化や回線当たりのコストの低減が図られている。

以上は静止衛星による衛星通信の動向であったが、イリジウム計画などにより、低軌道周回衛星による移動体衛星通信の計画もある。

II. 報告論文

(4) コンピュータ技術

コンピュータ技術についてはあまりにも論じることが多すぎるので、ここでは、金融へのインパクトを中心に考察を進めることにしたい。

イ. 3極化するコンピュータ

現在のコンピュータ技術の進展を素直に近未来まで延長して考えれば、コンピュータはワークステーション、メインフレーム、スーパーコンピュータに3極化し、これらがローカルエリア・ネットワークで結合している状態がポピュラーとなることが想定される（第6図）（相磯 [1990]）。ワークステーションは現在のメインフレーム程の能力をもち、必要な人に1台ずつ分散されておかれるようになる。メインフレームはファイル・サーバなどとしてワークステーション間のコミュニケーションの場としての機能を果たすことが主になろう。一方、スーパーコンピュータは TeraFLOPS（1秒間に 10^{12} 回浮動小数点演算を行う）マシンとなって、問題解決や高度な知識処理をサポートするようになる。

従って、どんなに複雑なアルゴリズムで

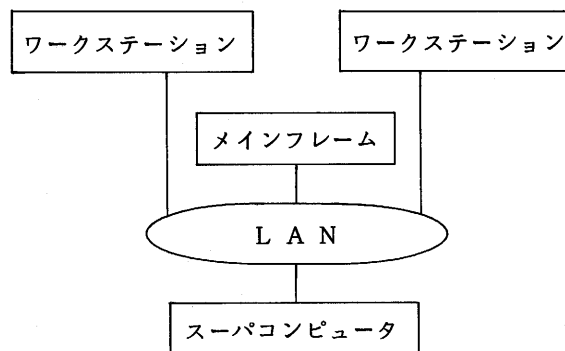
も基礎理論がしっかりしていれば、それがスーパーコンピュータに乗って実際の問題解決に役立つ場面が増えることが想定される。この意味で基礎理論の重要性を再び強調しておきたい。

ロ. フォールト・トレラント・コンピューティング・システム（電子情報通信学会誌 [1990a]）

このようにして、情報通信システムが社会のインフラストラクチャになるにつれて、その社会基盤としてのコンピュータ・システムの信頼性が極めて重要となる。ここに、信頼性の中には、環境の変化に強いロバスト性やユーザがそのシステムに信頼をもち得るディペンダブル性なども含まれよう。ここでは、特に、コンピュータ・システムの超高信頼化技術について概観しよう。

金融情報システムなどに見られる OLTP（On-line Transaction Processing）システムは一種のデータベース・システムで、オンラインで接続されている多数の端末から不規則に発生する処理要求にリアルタイムで応答するシステムのことである。従って、

第6図 コンピュータシステム



データベースの一貫性と完全性が要求されるとともに高い稼働率性が要求される。ここでは、OLTPのようなコンピュータ・システムの高信頼度化技法について考えよう。コンピュータ・システムに高信頼度性をもたせるためには、ハードウェアの故障とソフトウェアの故障およびオペレータのミスやシステム全般に加わる過負荷や災害や不正使用に対処し得るようなシステム構成が採られる必要がある。そのために、一般には、次のような冗長技術が採用されている。

- ① システムの構成要素を高信頼度化する。例えば、論理回路やメモリに誤り訂正機能を入れる。
- ② 構成要素を複数にし、故障の際に他の構成要素でカバーする（空間的冗長）。
- ③ 計算に怪しい点が出て来たらもう一度やり直す（時間的冗長）。

大雑把にコンピュータ・システムのハードウェアはコンピュータとネットワークとターミナルからなっているとモデル化することができる。また、コンピュータのハードウェアは電源装置、メモリ、CPU、入出力用CPU、入出力制御装置、通信制御装置、ディスクなどの構成要素に分類されよう。コンピュータ・システム・ハードウェアの冗長化による高信頼度化の方法としては、

- (i) 各構成要素を上記①に従って高信頼度化する。
- (ii) n 重システム化する。すなわち、同じシステムを n 個使って同じ計算をし、答えを比較する。
- (iii) スタンバイ・システム：現用系と待機系を用意し、現用系がダウンした場合に待機系に切り替える方式。待機系を

動作状態にしておく場合と停止状態にしておく場合で、ホット・スタンバイ・システムとコールド・スタンバイ・システムと区別することがある。

- (iv) $N+1$ アーキテクチャ：通常は $N+1$ 台の構成要素が待ち行列に入っている負荷を順次分担して負担しており、どれか一台が故障したときは残りの N 台でカバーする方式。

一般には上記の方式を組み合わせることも多い。また、上述の方法からも分かるように、系が故障したかどうかを検査し、どこが故障したのか診断する技術も重要である。自己診断回路としては故障を自己検出するまでは正しい出力を出し続けることが保証されるようなTSC (Totally Self Checking) 回路の設計方法などの研究が進んでいる。

また、ソフトウェア故障を検出するには独立した2チームがソフトウェア作成を行う2-バージョン・プログラミング手法や全く異なったアルゴリズムで2つのプログラムを作成して、両者の結果を比較するという手法が原始的ではあるが有効であろう。

コンピュータ・システムの信頼性の尺度としてはMTBF (Mean Time Between Failure、平均故障間隔) とMTTR (Mean Time To Repair、平均修理時間) がよく用いられている。

コンピュータ・システムの信頼性を高めるために必要と思われる今後の課題としては、ソフトウェアの信頼性、ネットワークの信頼性、ハードウェアの信頼性、そして、セキュリティという順に重要であるというアンケート結果がある。

II. 報告論文

(5) ネットワーク技術（電子情報通信学会誌 [1990b]）

情報通信ネットワーク技術はいろいろな情報通信端末を有機的に接続する技術である。これは広範な内容をもつので、ISDN から広帯域 ISDN へという流れの中でのみ概観することにした。

イ. ISDN（サービス統合デジタルネットワーク）

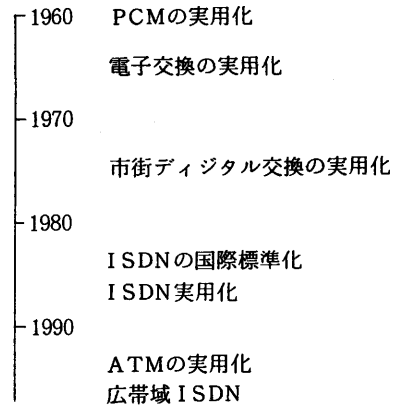
アナログからデジタルへという流れがネットワーク技術の原点であろう。デジタル方式で伝送、交換を始めとして情報通信を行えば安価で融通性のある情報通信が行えるというのが、原点にある。しかし、デジタル方式は非常に自由度が高いので、端末とネットワークの接続などに関して国際標準化を行ってから実現をするのが望ましい。このような考え方などにより ISDN の国際標準化が1982年にでき、1988年～89年に北米、日本、ヨーロッパなどで商用サービス提供が開始された（第7図）。情報はBチャンネルと呼ばれる64kbit/sのチャンネル、2チャンネルと16kbit/sのDチャンネルを1つとにより構成される。これは2B+Dと表される基本インターフェイスである。これと1.5Mbit/s程度の一次群インターフェイスがあり、狭帯域ISDNと呼ばれる。

ロ. 広帯域ネットワーク

これに対して、端末まで光ファイバを伸ばし、ATM（Asynchronous Transfer Mode: 非同期転送モード）などを利用して数100Mbit/sの情報をやり取りする広帯域ネットワークの研究が活発に行われるようになっていく。これは広帯域ISDNの標準化が急速に進展していることにもよる。ま

た、広帯域ネットワークとしては広帯域LANの研究も進展している。

第7図 ISDNの進展



4. 情報通信技術の基礎研究と技術革新

(1) 情報通信技術の基礎研究

情報通信技術に限らず、科学技術の研究者は、自身の興味によって研究を行っている。従って、その研究が重要であるか、はたまた、社会にインパクトを与えるか否かは、あまり研究推進の要素としては大きなものではないと思われる。しかし、人間の興味を引くものは、広い意味での応用をもつものであると思われるので、技術革新は人間が好奇心を失わない限り続いて行くものと思われる。特に、科学技術の歴史は、好奇心に導かれた深い研究によって得られた結果が、インパクトの大きな応用をもたらすことが多いことを示している。興味に導かれて深い研究をすることを基礎研究というならば、基礎研究によって大きなインパクトのある応用が現れるといってもよいであろう。その意味で、情報通信技術の基礎研究が今後どのくらい行われるかに情報通信技術の革新がどのように進んで行くか

がかかっているといえよう。

さて、情報通信技術の基礎としては、主に、物理的理論と数学的理論があると述べた。特に、VLSI 技術を基礎としたデジタル技術においては、数学的理論が、情報通信処理のよいアルゴリズムを与えるならば、そのまま、ハードウェア並びにソフトウェアとなって、実現される可能性が高くなっている。一方、物理学との関連においても、超伝導体の研究や光系の研究にみられるように、物理としての最先端の成果がそのまま情報通信技術に大きな寄与を与えることが多い。また、脳の研究や認知心理学など人間そのものに興味をもつ学問も、情報通信に大きな係わりをもってきているようになっている。このように、物理や数学や生体の研究といった人類の永遠の研究課題が直接間接に情報通信技術革新へのインパクトを与え、かつ、情報通信革新がそれらの研究の推進にインパクトを投げ返すというポジティブ・フィードバック・ループの存在の構図が、VLSI 技術などの裏付けによって出来上がったのが、情報通信技術革新の進展を支える柱になっていると思われる。

(2) 情報通信技術革新を支える基礎理論

上述のように VLSI 技術などの進展により、基礎理論が直接的にシステムとして実現されることが多いのが情報通信技術の特徴である。そのような背景もあり、この分野の理論は深い発展を遂げているものも多く、また、進展の速度にも著しいものが多い。このよう

な基礎理論には金融に対しても示唆を与えるものが多いと思われるので、ここでは、そのようなものを中心として、情報通信技術革新を支える理論体系について、その進展を中心に概観してみたい。

イ. 情報通信系基礎理論

情報を伝達する際に要求される事柄は、①早く、②誤りなく、③不要な人に知られずに、改竄されることなく（情報セキュリティを保つということが多い）、④安く、伝えることである（笠原 [1989]）。先に、情報という言葉は極めて多義であると述べたが、情報伝達という立場で、上述の目標を達成する観点からは Shannon による情報の定義があり、広く受け入れられている。Shannon は1947年に情報理論を発表し、ほとんど一夜にして、①、②に関する情報伝達に関する基礎理論を構築した。これが、情報理論⁴⁾である。

Shannon 理論登場以来40数年を経過するが、技術の裏付けをもつこれに匹敵する情報の理論はいまだに発見されておらず、現在ますます Shannon 的アプローチによる情報の研究が進展している。

金融情報を考えるとき、その本質を捉え得る極めて有効で技術に裏打された理論は情報理論であると思われる。

一方、符号理論⁵⁾は情報を誤りなく処理・伝達するための具体的アルゴリズムに関する理論である。

デジタル方式による移動通信や衛星通信

4) 情報理論によれば、情報の本質はその不確実性（確率統計性）にあり、求めている情報がコイン投げ何回分の不確実性をもつかというエントロピーによってその情報量が測られる。

5) 有限体論や代数幾何学など極めて高度な数学を使い、お遊び的な研究と見なされていたのが、VLSI 技術の進展により、そのアルゴリズムが LSI 化され、一気にデジタル技術を支える 1 つの根幹の技術になったのである。

II. 報告論文

が可能なのも符号理論による誤り制御技術によるところが多い。また、最近では、フォールト・トレラント・コンピューティングという信頼性の極めて高い計算機ハードウェア構成の基礎理論としても活用されている。フォールト・トレラント・コンピューティング技術によって、24時間連続運転が365日可能な信頼性の高い金融システムの実現などの応用も考えられる。更に、符号化変調技術など、ハードウェア・システムの軽量化や周波数の有効利用技術に直結する研究成果に著しいものがある。

情報セキュリティに関する理論としては、暗号理論がある。暗号理論も古典暗号に関しては1947年に Shannon がその基礎理論を与えた。ここに古典暗号というのは、暗号文を作るのと解読するのが同じ鍵であるものを指す。これに対し、公開鍵暗号と呼ばれる暗号化鍵と復号化鍵の異なる暗号方式アイデアが Diffie と Hellman によって1976年に発表された。この方式によれば、暗号化鍵から復号化鍵を作るのはほとんど不可能と考えられている。従って、暗号化鍵を公開し、復号化鍵のみを秘密にすれば十分である。ある人に暗号文を送りたければ、公開されている暗号化鍵を使って暗号文を送ればよい。復号化鍵を知らない人には暗号文を解読できないので、暗号文の伝送ができることになる。また、この考え方を少し発展させれば、誰が暗号文を送ったのかという署名もできるようになる。また、最近では、零知識証明と言って、相手に何

らの情報も与えずに、本人であることを納得させる技術が活発に研究されている。例えば、暗証番号を相手に知らせずに、その暗証番号をもつ本人であることを納得させる理論的方法があることも示されており、金融に応用できる技術であろう。

その他、印鑑像や指紋や声紋などによる個人認証の技術も進展を見せている。

また、安価な情報通信システムを構築する技術であるが、これはいかに VLSI などのハードウェアを安価に製造するかにかかっている。そのため、例えば、VLSI 設計理論や計算機による VLSI 設計工学が急速に進展し、10年前とは見違えるような設計支援ツールが開発されている。

また、どのような情報処理が計算機で計算できるかやどのようなアルゴリズムを設計すべきかの理論に計算理論⁶⁾がある。

ロ. システム系理論

システムのモデルを作り、そのシステムを制御するための制御理論は極めて高度に発展している。これは金融システムの制御にも通じるところのある理論体系であると思われる。

また、線形計画法や非線形計画法などの計画問題を含む最適化理論も金融には関連の深い理論である。線形計画法の分野で、カーマーカ法と呼ばれる新解法が現れ、これに対し、特許の申請が行われて、アルゴリズムに対する特許の有り方が問われているのは、よく知られている。

ダイナミカル・システム理論はシステム

6) この理論の1つの基礎は計算複雑さの理論であるが、その基本問題 $NP = P?$ 問題は未解決である。これは暗号理論の本質にも係わる重要問題で、現代暗号理論が未解決の予想命題 $NP \neq P$ に基礎をおいている場合があることに注意すべきである。

の動的振る舞いの解析や制御を行うための理論である。非線形理論の発展によりダイナミカル・システムは一定時間経過後、平衡点に落ち着くか、周期的に繰り返し色々な状態を遷移するか、あるいは極めて複雑に非周期的な状態遷移をするかのいずれかであることが明らかにされた。最後に述べた非周期的な状態遷移はカオス状態と呼ばれ、従来認知されていなかった新しい現象である。システムの性質が大きく変容する現象として注目されたカストロフ現象に対比されるような新しい概念で、金融システムにもカオス状態が生じているかもしれないのである。ダイナミカル・システムが平衡点に落ち着くことを前提に作られたのが、均衡経済学であるが、現代のダイナミカル・システム理論はそれ以外の定常状態が存在することを示しているのである。

予測理論はシステムの振る舞いを予測するための理論で金融システムの振る舞いの予測にも有用となることが考えられる。

ソフトウェア理論はソフトウェアをいかに効率的に作成するかなどを含めたソフトウェア作成のための理論体系であり、ソフトウェア作りのための計算機支援ツールの開発が盛んに行われている。また、オブジェクト指向プログラミングなどの新しいプログラミング方式により、ソフトウェアの生産性を高めるアプローチが進展している。

ハ. 人工知能関連の理論

知識工学はエキスパート・システムや推論コンピュータなど人工知能関連の技術の裏付けを与える工学体系である。アルゴリズムにより計算を進めるのではなく、人間のエキスパートが推論していくようなプロセスを模擬した計算方式をとるのがエキス

パート・システムの目標である。このため、もし何々であれば何々であるという形の if then ルールに知識をまとめ、知識データベース化し、現在どのような条件が成立しているかを入力して、推論エンジンにより、if then ルールを駆動して結論を導く方式などが考案されている。日本の第5世代コンピュータはプロログという理論型の言語を用いて、推論を並列的に進めて行く計算方式をとる計算機である。

これに対し、第6世代コンピューティング方式であるといわれているニューロコンピューティング方式は人間の脳の構成要素であるニューロンモデルをネットワーク化したシステムを使って計算することを目指した計算方式である。このような考え方は情報理論と同じく第2次大戦直後から論文に発表されているが、今回はニューロン系のエネルギー最小化問題をニューロコンピューティングの方式に関連させていることが新しい。脳がこのようなエネルギー最小化原理に従うことがありそうだと示唆される例が知られている。新しい計算方式として、ホップフィールド型の計算方式やバックプロパゲーション学習、ボルツマンマシンによる大域的な最大値計算方式などが提案された。現在はこれらの方法の問題点がむしろ議論されており、これらを超えるブレークスルーが模索されているのが現状である。

ファジイ理論は1965年に Zadeh によって論文発表されたファジイ集合論に基づく曖昧情報処理のための理論である。ファジイ理論の応用例は100件を楽に超えるが、それらの多くが日本での成果であることは特筆に値する。制御への応用が多いが、デー

II. 報告論文

データベースの曖昧検索やエキスパート・システムや意思決定支援システムへの応用も見られる。

5. 情報通信技術に限界はあるか

このように情報通信技術は高度に発展しているが、逆にそれゆえに、もう発展の限界がきているのではないかという議論もある。情報通信技術がどこまで進み得るかを夢想してみるのは楽しいことである。ここではとことん限界をつきつめたら情報通信技術開発にどんな限界がでてくるか、思考実験的に考えてみたい。

(1) コンピュータ素子の計算速度の限界

コンピュータ素子の計算速度の限界が、何によって与えられるかというのは難しい。ここでは、ニューリストと呼ばれる人間の神経系に模した計算方式による限界を算定しよう。この方式では神経繊維に相当する線路に幾つものパルスを走らせ、これがぶつかったときに壊れるか、すり抜けるか、あるいは線路の分岐点でどのように振る舞うかによって計算を進める。パルスの有無を1と0とに対応させれば、普通の計算機と同じ能力をもたせることができる。さて、最も速く走るパルスは光子（フォトン）数個からなるような光のパルスであろう。今、パルスはフォトン1個からなっているとすると、これは秒速約30万キロ $\div 3 \times 10^8 \text{m/sec}$ で進む。一方、これが線路中を伝搬しながら、計算を行うとすると、電子のド・ブロイ長 $0.1 \text{nm} = 10^{-10} \text{m}$ 程度進む間に計算を1つ行うのが1つの限度であ

ろう。すると、毎秒 10^{18} 回程度演算するのが、ニューリストの計算速度の限界であろう。

21世紀には毎秒 10^{12} 回程度演算処理（Tera FLOPS）をする超高速スーパーコンピュータの出現が期待されている。一方、現在はワークステーションレベルで毎秒 10^6 回演算処理するのが普通である。従って、ニューリストの演算スピードを極限に近く速くすると、その晩には、21世紀に出現が予測される超高速スーパーコンピュータが現在のありふれたワークステーションに見えるような、超超高速スーパーコンピュータができるものと想定される。従って、単純に言えば、今のワークステーションより、少なくとも、100万倍速いワークステーションが出てくるまでは、計算機技術の限界は迎えないということになる。⁷⁾

(2) 素子高密度化の限界

さて、現在のスーパーコンピュータは、別名、超高性能冷蔵庫であるといわれている。計算素子から発生する熱で計算機がオーバーヒートしないように冷却する必要があるからである。これに対して、今のスーパーコンピュータより遥かに高密度にニューロンが詰まっている人間の頭は、どんなに考えても、そう熱くはならない。なぜだろうか？これに対しては次のように説明ができる：熱が発生するのは、物理的にいえば摩擦などを考えてみれば分かるように、計算を行うために必要な、例えば、電子の運動のエネルギーが熱のエネルギーに変換されるからである。これは、例えれば、床にボールを転がしたとき、

7) 但し、ここでの議論は特定のモデルによる単体の計算素子の速さを論じており、計算方式を変えたり、素子を超並列化するなどの方法により、計算機自身の能力はもっと向上できる可能性がある。

摩擦によってボールが止まってしまう現象に対応している。一方、床を鏡のようにピカピカにして、必要ならば、下から空気を吹き出し、ホーバークラフトのようにボールを浮かすぐらゐに転がせば、ボールは半永久的に走り続ける。摩擦がほとんど効かないからである。このときは摩擦による熱もほとんど発生しない。

コンピュータになぜ熱が発生するかということの物理的な理由も実はまったく同じ原理によって説明できる。即ち、現在のコンピュータは計算するとそのときの摩擦熱によって発熱するため、冷却が極めて重要となるのである。そこで、摩擦が発生しないように、鏡の上をボールが転がるようにして、計算ができないかということが研究された。その結果、人間の頭のようにほとんど発熱することなしに計算できるコンピュータが原理的に可能であることが示されている。従って、あまり、神経質に冷却しなくても、人間の頭程度にしか熱くならない計算機が作れるはずである。このようにしてコンピュータの高密度化という限界も原理的にはクリアされる見込みである。

(3) 通信の限界

では、通信の限界はどうであろうか。通信を最も効率的に行って、光の粒子フォトン1個にどの位の情報をもたせることができるかということを考えよう。例えば、ある時間間隔の中のどの位置にパルスがあるかによって情報を伝える、パルス位置変調方式を考える。フォトン粒子であるから、その位置はどこにでも自由に置け、従って、この方式ではフォトン1個当たり幾らでも多くの情報を割り当てることができるように感じられる。しかし、

量子力学は、真空中にも揺らぎがあり、これがフォトンの位置に揺らぎを与えるため、原理的にも、フォトン1個に割り当てられる情報量に限界があることを教えてくれる。この値は5~6bit であるといわれている。

さて、現在の光強度変調による光ファイバ通信方式ではかなり効率的な通信を行っても相当数のフォトンで1つの光パルスを作って1bit の情報を送るのが精一杯であるから、例えば、仮に、 10^6 個のフォトンによって1bit の情報を送っているとすると、単純に言えば、今後通信の効率も100万倍改善される可能性のあることがわかる。人類が無線を使って、モールス符号などにより無線通信を始めたときには、毎秒多くても10bit の情報を送るのが最高であったが、現在では光ファイバを使って、楽々に毎秒 10^7 bit の情報を送ることができる。これも100万倍の進歩であるから、現在の光ファイバ通信が、トンツートンツ時代通信であると感じられるほどに発達した通信が行える頃に、そろそろ、通信の限界が理論的に問題になるということである。

(4) ソフトウェア生産性に限界はあるか

以上では、ハードウェアに関する限界について論じたが、ソフトウェアについてはどうであろうか。

イ. フォンノイマン方式の限界

理論的にいうと、ソフトウェアの基礎理論はいろいろな意味で不完全なのである。

まず、ソフトウェア理論の基礎は数学であるが、数学では有名な不完全性定理があり、自然数論を含むような数学体系では、その枠内で正しいとも、正しくないとも証明のつかない命題が存在するのである。従って、われわれが、ソフトウェアの数学的基礎と

II. 報告論文

して、ある命題を示そうとしても、それがきちんと証明できるか否かは、運任せであり、その人の直観的能力に依存しているといえることができる。というといわずらに不安を感じることがあるかも知れないが、ほとんどの場合きちんと証明ができるものなので心配は要らないのである。

次に、ソフトウェア理論の基礎に来るのは、与えられた問題が数学的に解けるにせよ、それが、コンピュータに乗せられるかどうかという計算可能性の理論である。どのような問題が計算可能であるか、あるいは、コンピュータとはそもそもどんなものであるか、ということの問題にする学問である。これに対しては、イギリスの Turing が万能チューリング機械というコンピュータの数学モデルを提出し、これで計算できる問題が計算機で計算できる問題であると定義した。しかし、計算機で計算できる問題はこれに限るということを証明するのは極めて難しい問題である。従って、そのような証明はその後現れず、その代わり、まったく異なった幾つもの計算可能性の定義が現れ、それらが同値であることが示された。そこで、Church はチューリング機械で計算できる問題が計算可能な問題であると考えようと提唱した。これが、現在受け入れられている計算可能性の定義である。従って、この定義が本当に正しいのかどうか、その数学的保証はないのである。これが、ソフトウェアの基礎の第2の不完全性である。ちなみに、我々の前にあるワークステーションなどの計算機は全てメモリ容量が有限の万能チューリング機械である。従って、これで計算できないような計算可能な問題は Church の提唱を認め

るならば原理的にはないのである。

では、計算可能な問題ならば、計算機にすべて乗せられるかということこれも問題なのである。銀行の経理の問題を例に考えてみよう。今、1つの銀行の一日の経理に要する時間が1秒であるような、超スーパーコンピュータが導入されたとしよう。さて、銀行は本店だけでなく支店が沢山あるので、その支店の経理も引き受けることにする。支店の数を N 店とする。経理に要する手間は支店の数が増えればお互いのやり取りを考えなくてはいけないので、支店の数が N であれば、 N 秒で済む訳ではない。ここでは、

$$T = (\text{経理に要する時間}) = N^3 \text{ 秒}$$

という数式モデルを考えておこう。これは連立1次方程式を解く手間に相当する。 $N = 1$ のときは $T = 1$ 秒である。さて、支店の数を増やしていこう。 $N = 2$ のときは $T = 8$ 秒、 $N = 3$ のときには $T = 27$ 秒、 $N = 4$ のときには $T = 64$ 秒となり、1分を超えた。20店で約2時間、40店で約1日かかる。これは1日の経理を1日かけてやることに相当するので、ここまでが限度である。超スーパーコンピュータを導入したのに40店の経理しかできないのでは情けないというので、

$$T = (\text{経理に要する時間}) = N^2 \text{ 秒}$$

にソフトウェアを改善したとする。すると、 $N = 40$ でも T は25分程度となって大幅な改善が行われる。こうなると1日で処理できる支店数も300に近くなる。ここでアルゴリズムを少しでも改善して、

$$T = (\text{経理に要する時間}) = N^{1.5} \text{ 秒}$$

にでもなると、また1日で処理できる支店数は桁が違ってくるのである。

こうして、研究者は、アルゴリズムの手間を少しでも少ないオーダーにするために血眼になるという訳である。一般に、問題のサイズを N とするとき、 a を定数として問題を解く手間 T が $T = N^a$ となる問題を多項式時間で解ける問題と呼んで、クラス P と書き、易しい問題と呼んでいる。しかし、 $a = 3$ でも結構しんどいことは先の例でみたとおりである。われわれは、 $a = 1000$ でも構わず易しい問題と呼ぶ。従って、コンピュータでまともに解くのは易しい問題にはほぼ限定される。

一方、難しい問題は $T = A^N$ となる問題である。ただし、 A は1より大きな定数である。これは、 N が増え、いわゆる冪算式に手間が増える問題のクラスである。

さて、実はこの2つのクラスの間には NP という問題のクラスがあって、実用的な問題の多くがこのクラスに落ち込むのであるが、これがクラス P なのかどうか、理論的にわかっていないのである。ちなみに、 N は Nondeterministic の N で選択に迷っているとき、間違わずに正しい選択ができるという計算素子を使っただけの計算であることを指す。勿論、そんな神様みたいな素子は実在しない。クラス NP というのはそんな素子を使ったら、多項式時間で解けるという問題のクラスをいう。現代の公開鍵暗号は $P \neq NP$ という仮定のもとに作られている暗号である。以上が3つ目の不完全性である。

以上により、ソフトウェアの理論体系自

身にも、将来へ向けて解決しなければならない基礎的課題が多く残されていることがわかる。これは逆に夢のある話ではないだろうか。まだ、限界を論ずべき理論も確立していないのであるから。

ロ. 非ノイマン方式

プログラム=アルゴリズム+データ構造という図式がノイマン方式であるとする、ノイマンはそれ以外の計算方式の重要性についても論じている。また、formal logic ではなく analytical な計算方式に関する夢ももっていた。この夢の一部は現在のニューロコンピュータに関連する。

さて、ソフトウェアの開発に当たって、ノイマン方式はその生産性に限界を与える可能性がある。ヒューマン・インターフェイスやソフトウェア作成支援ツールを開発することによってこの限界は大きく後退するかも知れないが、もっと別のソフトウェア作法が必要にも感じられる。1つの極限として想定されるのは、問題をモデル化すると、それに合わせてコンピュータが自己組織化され、勝手にシミュレーションを始め、その結果が信頼できるか否か判断するような方式が考えられる。例えば、金融の予測をする場合には、どの要因とどの要因がこう絡み合っていて、これがこう重要だとコンピュータと相談しつつ適切に分析していくと、分析が進むにつれて、その分析内容のモデルがコンピュータの中に自己組織化され、それではこの場合どうなるだろうということ、コンピュータが自分でモデルを動かしてそこから予想を引き出してくれるというような計算方式である。これならば、ソフトウェアの生産性の限界はさらに遠のくかも知れない。

6. 日米の技術比較

情報通信技術が国際的にみてどのような位置にあるか、日米の技術比較をしながら考察してみたい。但し、著者が十分なデータをもっている訳ではないので、ここでは、「ゲーム感覚」で、どちらがどの程度進んでいるかを、主観に基づいて100分率（パーセント）で分析する手法を紹介しつつ、例として著者の分析結果を示そう。

(1) ゲーム感覚意思決定法

これは、Sarty が創案した AHP (Analytic Hierarchy Process) の刀根薫氏による訳語である (刀根 [1986])。なかなか、うまい方法であるので、これを使って日米の情報通信技術比較を行ってみる。

問題は日米の情報通信技術の比較で、どちらがどのくらい優れているかを百分率で答えを出すことを目標とする。そのために、評価基準を幾つか導入し、各評価基準における日米の比較を行う。この比較は次の方法により、スコアとして記録する：

- ① 日本とアメリカで同程度なら1点
- ② 日本がアメリカより少し優れていれば3点、逆なら $\frac{1}{3}$ 点
- ③ 日本がアメリカより優れているならば5点、逆なら $\frac{1}{5}$ 点
- ④ 日本がアメリカよりかなり優れているならば7点、逆なら $\frac{1}{7}$ 点
- ⑤ 日本がアメリカより決定的に優れているならば9点、逆なら $\frac{1}{9}$ 点。

この評点が出てくれば、後は自動的に日米間の優劣が百分率で計算できるのが、AHP である。評価基準、およびその評価基準による評点を読者がそれぞれ与えれば、その読者の

主観的判断による日米比較が数量化される。

(2) 著者による日米比較の例

ここで、著者の主観に基づく日米比較の例を示そう。評価基準として、

- a. 基礎研究
- b. 開発研究
- c. ハードウェア製造技術
- d. ソフトウェア製造技術

を採り上げてみる。

a. 基礎研究

日米間の基礎研究を比較するのもそう易しい事ではない。日本における独創的な研究もかなりみられる。しかし、ニューロの研究にしてもそうであるが、アメリカで種が出て流行の波が日本に及ぶものも多く、また、面白い研究の芽がアメリカに多く出てきていることも、また事実である。例えば、学会でアメリカでは面白いことを発表すれば一躍スターになることもあるが、日本ではなかなか認められないことも多い。面白いことを面白いと素直に認める面において、一日の長がアメリカにはあるのではないだろうか。予算、研究者の数においてラフに言えば、3倍はアメリカの方が多いのではないだろうか。その意味で、評点は $\frac{1}{3}$ 点。

b. 開発研究

これも日米間の比較は難しい。日本の企業レベルでの研究の多くはこのレベルであるから、日本のレベルもかなりよいと考えられる。評点は1点。

c. ハードウェア製造技術

新製品の開発や、先端的な製品の開発にアメリカはみるべきものがあるが、メモリなど大量に精度よく製造する技術は日本が

かなり優れている。評点は5点。

d. ソフトウェア製造技術

面白いソフトウェアを作ることや、新しい部門のソフトウェアを作ることに関しては日本は米国と比較するレベルに達していないといえよう。ただ、ある範囲内のものを作らせるのであれば、日本のものは信頼性よく作れる。評点は $\frac{1}{3}$ 点。

次に、これらの評価項目間の重要性の比較をしておく必要があるが、この比較は難しいため、取敢えず、各評価項目間の重要性は等しいものとする。

以上の結果をもとに AHP の手法で、著者の日米比較を数量化すると日本の47、米国の53となる。これはかなり近似を用いた計算であるが、著者の主観では、ソフトの基礎になる研究に重点を置いて評価したので、アメリカのソフト優位性がでなかったのと、ハードウェア製造技術の日本の優位性をかなり評価したための結果である。

7. おわりに

本論文では、情報通信技術の動向と将来展望について、一研究者の立場から整理した結果について報告した。技術的にはやりたいことが何とか自由にできるようになりつつあるというのが、情報通信技術の現状である。その意味で、情報通信技術の発展とその応用の進展は今後が極めて楽しみであるということができよう。また、このように、今後急速な進展が予想されると、社会におけるインフラとしての情報通信システムをどのように整備していくかという問題が大きな問題となつてこよう。どのような情報通信システムを構築していくことが人類に貢献することになるのかというような、深い意味での社会性を考え

つつ、その成長を見守る必要があるということである。具体的には、情報通信に関する規制の問題や情報通信システムの標準化の問題がある。人間の伸び伸びとした発想を活かしつつ、かつ整合性のある発展を期待するというのは極めて難しいことであるが、ぜひ実現させなくてはならない問題である。システムはその構築に手間と費用がかかる場合、システムを作るということは将来のガイドラインを与えることになる。また、逆に将来から過去を眺めると、作られてあるものは歴史の重みとなる。このように、情報通信システムは過去を引きずる系であり、その発展のコントロールの問題は慎重にかつ深く洞察すべき問題であろう。

さて、最後にぜひ言及しておきたいことは、情報通信技術の発展における応用と基礎研究の相互依存関係である。情報通信技術はインフラ的な側面をもつので、広くいろいろな分野と関係する。しかし、例えば、人工知能の応用を考える場合を想定してもよく分かるように、本当に有用なシステムを構築するためには、人工知能研究の原点に立ち返った基礎研究が極めて重要となる。ものごとの本質を照らし出す理論ができた場合、それをアルゴリズム化し、ハードウェアにすることは VLSI 製造技術の進展により、可能となることが多いからである。従って、基礎研究と応用とのポジティブ・フィードバックの仕組みを各分野と巧みに作っていくことが、情報通信技術の今後の発展を促すうえで極めて重要であると思われる。

以 上

[早稲田大学理工学部教授]

Ⅱ．報告論文

【参考文献】

- 相磯 秀夫、「コンピュータが情報社会に及ぼすインパクト」、電子情報通信学会誌 Vol.73、No.1、1990年、pp.6-9
- 笠原 正雄、「ブロック符号の復号法」、1989 情報理論とその応用、暗号と情報セキュリティジョイントワークショップ講演論文集、1989年、pp.41-50
- 寺田 浩詔、「通信網の発展と情報化社会」、電子情報通信学会誌 Vol.73、No.1、1990年、pp.10-13
- 電子情報通信学会、「量子効果デバイスの現状展望小特集」、電子情報通信学会誌 Vol.72、No.12、1989a 年
- 、「次世代光通信・処理技術の展望小特集」、電子情報通信学会誌 Vol.72、No.2、1989b 年
- 、「衛星通信小特集」、電子情報通信学会誌 Vol.72、No.11、1989c 年
- 、「フォールトトレランスシステム特集」、電子情報通信学会誌 Vol.73、No.11、1990a 年
- 、「ISDN 利用の高度化へ向けての小特集」、電子情報通信学会誌 Vol.73、No.3、1990b 年
- 刀根 薫、『ゲーム感覚意思決定法』、日科技連、1986年