

ユビキタスコンピューティングとトロン

Ubiquitous Computing and TRON

東京大学情報基盤センター助教授
越塚登

■ユビキタスコンピューティングとは？

近年、人間の生活空間のあらゆるところにコンピュータを埋め込み、それでいながら人間はコンピュータの存在を意識することなく、そこからサービスを自然と受けるような、コンピュータのありかたを「ユビキタスコンピューティング」(Ubiquitous Computing)と呼んでいる。「Ubiquitous」とは普段は聞き慣れない英語だが、日本語にすると「遍在する」、もっと簡単に言えば、「どこにでもある」という意味である。この言葉の後に "Computing" と続け、"Ubiquitous Computing" ということによって「遍在する計算力」となる。より噛み砕いて言えば、我々の生活のあらゆる所にコンピュータを埋め込み、それらが互いに協調動作することによって、人間生活のあらゆる場面をサポートするコンピュータのありかたということになる。

同様の概念を表す言葉として、"Pervasive Computing" (しみこんだ計算力) や "Invisible Computing" (見えない計算力) などがある。これらも基本的には、ユビキタスコンピューティングと同様の意味に用いられるが、名づけた人や組織が異なっている。我が国で「ユビキタス」という単語が使われることが多いのは、発音が一番カタカナ的で、十分外国人に通じる単語だったからであろう。

ユビキタスコンピューティングの例 1：

トロン電腦住宅

コンピュータを家中に埋め込んで、「ユビキタス」な「住宅」を作ったらどのようになるだろうか。私達の研究プロジェクトでは、こうした住宅を10年以上も前に構築し、様々な研究や実験を行い、これを、「トロン電腦住宅」と名づけた。

「トロン電腦住宅」では、家のあらゆるところ

にセンサーが埋め込まれており、温度や湿度、明るさ、人がいるかどうか、音量といった人間生活環境をウォッチしている。夏、部屋が暑いので、手元の小型端末から温度を下げるように指示操作をする。ここで電腦住宅システムは単純に冷房をつけるようなことはしない。屋外の温度センサーと部屋の中の温度センサーが、屋内外の温度を把握している。外気は部屋の中と比べて温度が低く涼しそうだ。もしも、この人が、「クーラーの冷気よりも自然の外気が好み」、と登録されていれば、電腦住宅システムは冷房ではなく、窓を開けて自然な外気を入れて部屋の温度を下げる。風の方向も観測して、最適な方向の窓を開閉するので。

しかし、娘が部屋のステレオで音楽を聴き始めた。大きな音がでている。恐らく近所まで音が漏れているだろう。そうした場合、電腦住宅システムは屋外の音センサーがステレオの音を認識し、窓を閉めて冷房をつける。すると部屋に電話がかかってきた。受話器をとると、ステレオの音が電話に入らないように、自動的に音量を絞る。話終わって受話器を置くと、ステレオの音は元に戻った。

ユビキタスコンピュータの考え方は、1980年代後半から1990年代の前半に世界各地で同時に提唱された。この考え方の最初の提唱者の一人が坂村健博士(現東京大学教授、図1)であり、「どこでもコンピュータ」、「超機能分散システム」と呼び、1980年代に世界に先駆けて提唱した。米国でもゼロックス社パロアルト研究センターのマークワイザー博士が同様の考え方を提唱し、それをユビキタスコンピューティングと名づけた。現在、このユビキタスコンピューティングは、1990年代に世界を席卷したパーソナルコンピュータとインターネットの次の世代のコンピュータ

やネットワークのあり方として世界的に注目されている。情報技術（IT）の分野は外国発の技術や考え方が多いが、このユビキタスコンピューティングは、坂村博士による、れっきとした我が国の独自技術であり、日本オリジナルのITモデルである。



図1：坂村健 博士

ユビキタスコンピューティングが実現できるようになった最も重要な技術革新は、コンピュータが劇的に小さくなったことと、信じられないほど安くなったことである。例えば、大型計算機のようにコンピュータが部屋いっぱいの大きさであったら、ユビキタスコンピューティングは実現できない。ところが、最新の半導体の製造技術を駆使すると、一昔前に使われていた8ビットや16ビット程度のマイコンであれば、数mm角程度のチップで、しかも数十円といった製造コストで実現できると言われている。

実はこの小型化と低価格化は非常に重要で意義深い。というのも、コンピュータやITの世界のほとんどの概念やモデルは、コンピュータが生まれてから10年程度の、1940～50年代までには、ほぼ出尽くしていたと言っても過言ではない。人工知能、ネットワーク、ハイパーメディアといったアイデア自体は決して新しいものではない。今までは、これらのアイデアを実際に作りあげる技術がなかっただけで、近年の情報技術や電子技術の進歩によって、現実的なコストで実現できるようになったのだ。

ところが、過去の聡明な計算機科学者達でさえも、到底思いもよらなかったことがある。それは、コンピュータがここまで小さく、ここまで安くなったことである。当時、コンピュータといえば、部屋一杯の大きさを占め、非常に高価なものであ

った。こうしたコンピュータが数mm角の大きさになり、1ドルよりも安くなることなど、誰が想像できたろうか。従って、そうした小さく安いコンピュータを使って何ができるのか、といったことは、昔は考えられなかったのである。つまり、ユビキタスコンピューティングは、まさに「今」の時代の考え方であり、「今」の技術なのである。それゆえに科学者や技術者の期待も大きいのである。

■ユビキタスを支える超小型チップ技術

それでは、現在ユビキタスコンピューティングをもたらし、超小型チップとはどのようなものか紹介したい。ここで超小型チップとは、「超小型」という程であるから、チップ本体がおおよそ数ミリ～1ミリ角より小さい程度のものを指す。更に、これにはデータ通信のための配線やアンテナが加わる。その全体のパッケージは、カード型や楊枝のような棒状であったり、ちょうど飲み薬のカプセルのような形状や、薄っぺらの宛名シールのような形状などが様々な種類がある。

チップには、計算などの情報処理をする能力をもち、いわゆる普通のコンピュータと同じ機能をもつものと、情報を格納するメモリ機能だけをもつものがある。前者は主に、ICカードやスマートカードと呼ばれる製品に利用され、カード内のコンピュータと有線通信をするタイプのもの（接触型、図2左）と、無線通信をするタイプのもの（非接触型、図2右）がある。接触型は主にクレジットカードや社員証、学生証などに利用されている。非接触型はJR東日本や西日本での定期券SuicaやICOCA、また、ホテルのルームキーなどに使われている。



図2：ICカードの例（左：接触型，右：非接触型）

後者のメモリ機能だけのものは、**RFID (Radio Frequency Identification)** と呼ばれ、内部の情報を電波や電磁波を使った無線通信で読み書きすることができる。このRFIDは、工場などの生産現場における、生産品種、機種、ロット管理、生産工程の履歴管理、検査工程での検査情報管理などで実用化されている。近年、ユビキタスコンピューティングへの期待の高まりに伴って、日用品にもこのRFIDをつける利用法が模索されている。例えば、洋服にRFIDをつけて、そこに洗濯の方法に関するデータを格納しておく。洗濯機にはRFIDを読み取る装置をつけておき、洗濯機に洗濯物をいれると自動的に洗濯の具合を制御するシステムが構築できる。

■超小型チップの例：スマートダスト（米国UCB）

米国のカリフォルニア大学バークレー校（UCB）で実施されている、「エンデバークプロジェクト」（**Endeavor Project**）と呼ばれるユビキタスコンピューティングの研究プロジェクトでは、「塵」のように小さいコンピュータを作る研究をしている。それを「賢い埃」（**SmartDust**）と呼んでいる。最先端の半導体技術を用いて、非常に小さいチップ上にコンピュータと通信回路を搭載している。このSmartDustにセンサーを取り付け、それを広くばら撒き、観測データを送信する応用を念頭に置き研究している。

■超小型チップの例：ミューチップ（日立製作所）

こうした小型チップを作るのは、いってみれば日本の半導体業界のお家芸である。例えば、日立製作所は、ミューチップと呼ぶ超小型のRFIDを開発した。大きさ0.4mm角のチップの中に、あらかじめ128ビットの数字が格納されている（図3）。この数字を、無線通信によって、離れた場所にある読み取り機から読み取ることができる。この数字は、書き換えはできないが、チップが製造されたときに、個々のチップ毎に異なるものがセットされている。こうした小型チップは、様々な商品パッケージにつけることで、モノを自動認識する応用法や、また偽造防止、盗難防止のため

に使われている。

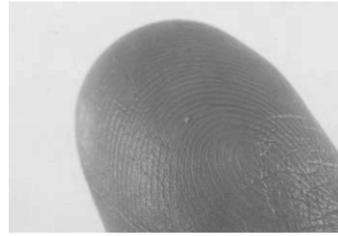


図3：ミューチップ（指の上のほこりのようなものがチップ本体）

ユビキタスコンピューティングの例2：

薬瓶から飲み合わせの警告

近年、薬剤の誤使用による事故が多い。時折、事件として報道されるように、病院における薬の投与ミスによる事故もあれば、薬の飲み合わせによる事故も多いといわれている。こういった事故は、飲む患者側が十分に注意していれば防げることはあるが、誰もが常に注意を払っているとは限らない。歳をとると、老眼になり、薬のパッケージをうまく識別できずに、薬を間違えることもある。

こういった問題の解決に超小型チップを応用することができる。すべての薬瓶には、その薬の情報を格納した超小型チップを埋め込んでおく。同時に飲む薬瓶を近づけると、これらのコンピュータが互いに情報交換を行い、飲み合わせが悪いときや、薬が間違っている時には、薬瓶から手元の携帯電話に、「この薬の飲み合わせは悪いですよ」とか、「飲む薬を間違ってませんか?」といった電話がかかってくる。

また、病院の点滴の投与の時などにも同じようなチェックが行える。患者の病状情報を小型チップに格納して患者の手首に貼っておく。点滴の薬瓶にもその薬剤の内容を格納した小型チップを貼っておく。点滴投与の時に、両方のチップの情報を携帯電話程度の小型端末で照合し、この患者にこの薬が投与されるはずがないと判断されたら、看護婦さんに対して注意を促すサインを出すことができる。

これですべての事故がなくなるわけではないが、どうしても人間につきまとう単純ミスを「ユビキタスコンピューティング」の助けによって軽

減することができる」と期待されている。



図4：薬瓶から副作用の警告

■ トロン：「ユビキタス」を目指す日本発のオリジナルコンピュータ

トロンプロジェクト (TRON Project) は、世界で初めてユビキタスコンピューティングの実現を目的に据えて、坂村健博士がプロジェクトリーダーとして1984年からスタートした、ITの産学協同プロジェクトである。トロンプロジェクトでは、ユビキタスコンピューティングという概念が表すような、コンピュータが埋め込まれた電子機器が互いにネットワーク接続されて協調動作することによって、人間生活を基本的な部分から支えるようなコンピュータシステムを最終目標としており、こうしたシステムのことを、**超機能分散システム (Highly Functionally Distributed System)**と呼んでいる。そして、超機能分散システムを構成する電子機器のことを、**インテリジェントオブジェクト (Intelligent Object)**と呼ぶ。既に、IT関連企業を中心として、国内・海外における数百社との共同研究開発プロジェクトである。

トロンプロジェクトの「トロン」とはTRONとつづり、これは、The Real-time Operating system Nucleusを略したものである。日本語にすると、「リアルタイム性のあるオペレーティングシステム (注1)の核」という意味である。(以下、単に「トロン」と言った場合、トロンプロジェクトが生み出したオペレーティングシステムなどのソフトウェアや、ハードウェアなどをまとめて指す

ものとする。) トロンの特徴はこの「リアルタイム性」である。「リアルタイム性」とは何かというと、日本語にすると「実時間性」という意味で、人間が生活している実世界における時間にきちんと追従してコンピュータ動作できる性質を表す。つまり、人がコンピュータの処理の終わりを待つ必要がなく、人の活動の速さに合わせ、十分な性能でコンピュータが動くことを保証することを表す。より簡単にいうと、例えば現在のパソコンなどは電子メールを書こうと思って電源を投入すると、OSや電子メールソフトウェアが起動して、電子メールが書けるようになるまで、1分も2分も待つことがある。こういった、人がコンピュータの処理を待つようなものは、「リアルタイム性」があるとはいえない。ところが、携帯電話を例にとると、電源を入れれば、すぐに電子メールを書いたり読んだりすることができる。これは、「リアルタイム性」のあるコンピュータとしては非常に重要な性質の一つである。なぜ、携帯電話ではこんなにすぐに電子メールが使えるかと言えば、中の基本ソフトウェアがトロンだからである。

現在、トロンは、「リアルタイム性」が要求される分野においては、世界で最も多く利用されている。例えば、現在の携帯電話は多機能化してきたため、単に電話の機械というよりは、通信機能をもった一人前のマイクロコンピュータである。この日本の携帯電話を制御しているコンピュータの基本ソフトウェアは、ほぼ100%トロンである。また、我が国の主要な自動車メーカーの自動車のエンジン制御に利用されているコンピュータも、トロンである。NTTのデジタル通信網である、ISDNの交換機の多くもトロンで作られている。我々の調査によれば、日本の家電や事務機器などの高機能な電化製品に埋め込まれているコンピュータを制御する基本ソフトウェアの約半数がトロンである。人工衛星「きく2号」には、トロンプロジェクトが生み出したCPU (注2)「トロンチップ」が搭載されて地球の周りを回っている。このように、主に電子機器や機械などに組み込まれ、「リアルタイム性」が要求されるシステムにおいては、トロンは世界で最も多く利用されている。

アメリカ政府の調査によると、世界で出荷されるコンピュータの数は、全体で約80億個程度で

あるといわれている。そのうち、画面がついてキーボードがついて、いわゆるパソコンやワークステーションと呼ばれるような、コンピュータらしいコンピュータは、約1億5000万個程度である。すると、残りの90%以上はすべて、電気製品や自動車などに組み込まれる、いわばトロンが最も使われている分野のコンピュータなのである。従って、トロンは世界で最も多く使われているコンピュータの基本ソフトウェアであって、恐らく日本のどの家庭にも必ず、トロンで作られているコンピュータが複数台あるはずである。

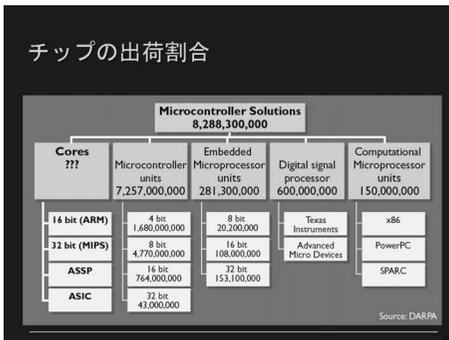


図5：マイクロチップコンピュータの出荷数の割合（DARPA調査より）

DARPA: 米国国防総省高等研究計画局

■トロンプロジェクトにおける「ユビキタス」への取り組み

既に、リアルタイム性が要求される機器組込型のコンピュータで高い性能を発揮し、多くの機器でトロンが使われている。つまり、ユビキタスコンピュータリングで、身の回りに埋め込まれる多くのコンピュータとして、トロンは非常に適したコンピュータであり、既にそうした应用到多く使われている実績がある。

それでも、今後ますますユビキタスへの取り組みが盛んになると、身の回りには、現在より、もっともっと多くのコンピュータが使われるようになる。そこで問題になることは、コンピュータのハードウェアやソフトウェアをそれだけ多く生産することが難しくなるという問題が指摘されている。既に、携帯電話ですら、高機能化にともない、ソフトウェアがうまく作れなくなってきたという状況が報告されている。

こうした問題がおきる原因の一つは、機器組込型コンピュータの規格が統一されておらず、各社または各製品ごとに、ハードウェアやソフトウェアを一から設計し直している点にある。そこで、こうした機器組込型コンピュータのハードウェアとソフトウェアに対して、トロンプロジェクトでは**T-Engine**、**T-Kernel**という標準規格を提唱している。標準化によって、各社や各製品に共通な部分は、過去に作ったハードウェアやソフトウェアを再利用することで、開発の手間を軽減することができるのである。

トロンプロジェクトが提唱したこの標準規格には、コンピュータや携帯電話の会社を中心として国内外100社余りの企業が賛同し、非常にアクティブな研究開発が進められている。

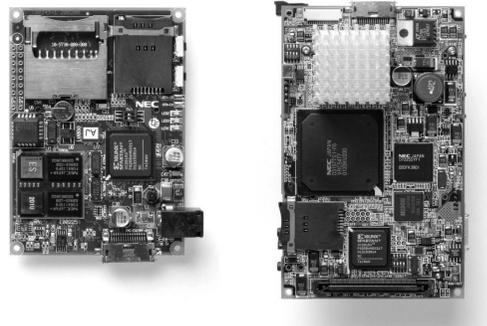


図6：トロンプロジェクトが提唱するT-Engine規格のコンピュータ

(左：μ T-Engine, 右：T-Engine)

■eTRON

この原稿を書いている時、コンピュータウイルスによってインターネット上の通信障害などの被害が世界的に出たことが新聞各紙などで報道された（注3）。これは、パソコン上のソフトウェアのセキュリティ上のバグをついたものではないかと推測されている。インターネットは、もともとは米軍の軍用ネットワークとしてスタートし、設計当初は一般に開放して利用することが想定されていなかった。従って、セキュリティを確保する機能が基本設計に含まれていないため、被害が生じるような攻撃が比較的頻繁に起きることを許してしまう。同じことがユビキタスコンピュータリングでおきたらと考えると、インターネ

ットにおける被害と比べ、生活に密着している度合いが全く違うため、その影響ははるかに甚大である。従って、ユビキタスコンピューティングでは、設計当初から「セキュリティ」のことを十分に考慮しなければならない。そこで、トロンププロジェクトでは、ユビキタスコンピューティング向けの暗号認証通信の基盤システムとして、**eTRON (Entity TRON)** に取り組んでいる。eTRONでは、重要な情報は、悪意のある人が解析して覗き見をしたり、内容を改竄することができないように、ハードウェアでしっかり守られたチップに格納することになっている。チップの中の情報を、他の人や機械に通信して渡すときは、通信相手もこのeTRONのチップを持たなければならない。そして、チップとチップの間を、暗号通信路で結んで、セキュアな通信を保証するのである。



図7：eTRONチップを格納したカードとT-Engine

■トロンププロジェクトにおける教育用コンピュータへの取り組み

ユビキタスコンピューティングでも、パソコンのように、画面とキーボードを備え、人が相対して使うコンピュータは必要である。そうしたコンピュータとして、トロンププロジェクトでは**BTRON (Business TRON)** というものを提供している。このBTRONはWebのようなハイパーメディアの機能を基本ソフトウェアのファイルシステムのレベルで備えている。更にWebだと、ハイパーメディアを閲覧することは簡単であるが、Webページを作成することはワープロで文章を書くように簡単にはいかない。しかし、BTRON

では、ハイパーメディアを基本ソフトウェアがサポートしていることから、ワープロで文章を作ったり、表計算で表を作る作業と、ハイパーメディアを作る作業が全く同じようにできる。また、日本で使うことを考慮し、漢字を10万文字以上も使えるようになっている。自分の名前の文字がパソコンで使えない人というのは、恐らく1クラスに1人程度は必ずいると思う。なぜ、動画や音声などのマルチメディアができる高機能なパソコンで、名前を書くという基本的なことができないのかと不思議だが、BTRONではそのようなことはない。また、身体に障害があったり、怪我などで一時的に手足が不自由になったときでもコンピュータを利用できるような調整機能として、イネーブルウェア (Enableware) の機能も標準機能として備えている。

このような先進的な機能を、約20年ほど前から提供している。これらの機能は、教育をする時に適しているという高い評価を得て、1980年代には、日本の初等・中等教育に導入するコンピュータとして、BTRONの採用が一時決まった。しかし、その後このBTRONが非関税障壁の候補として米国から挙げられ(注4)、結局文部省はその採用を見送った。しかし、BTRONのこうした機能は、子供達に最初に情報教科を教えるときに使うコンピュータとして最も優れたものではないかと考えている。

■まとめ

トロンププロジェクトをはじめとして、世界的に取り組まれている「ユビキタスコンピューティング」の世界が本当に世の中に浸透するには、恐らくあと10年程度はかかるのではないと思われる。コンピュータシステムは発案されてから、普及するためには、10～20年以上の時間がかかるのが通常である。

例えば、インターネットも、原型として設立されたARPANETは1960年代であるが、それが爆発的に普及したのは、1990年代である。リナックス (Linux) やMac OS XやMicrosoft Windowsは、すべてAT&Tベル研究所で開発されたユニックス (Unix) と呼ばれる基本ソフトウェアを祖先としており、それを継承したり改造を加えて開発

されたものである。やはりこのユニックスも開発されたのは、1970年代であり、リナックス、Mac OS、Windows、多少時代の前後があるが、ともに1990年代に入ってから爆発的に使われるようになった。

そうすると、恐らく、今の高校生あたりが社会の一線で働き始めるときが、まさに約10年後である。確かに、現在はインターネットとパソコンの時代であるが、高校生たちが活躍する時代は「ユビキタス」時代である可能性が極めて高い。しかも、この「ユビキタス」の概念は、新しいものの好きの日本人が流行の一つとして海外から輸入したものではなく、坂村博士が発案者として、我が国でオリジナルに考え出したコンセプトである。従って、その最先端もその未来もすべて日本にある。

ドッグイヤーとも言われ、めまぐるしく変わるITの分野の先を見越すことは大変難しいが、そういった「ユビキタス」時代になっても役立つ、また、そういう時代だからこそ役立つ情報教育を、高校の教師の皆様にしていただけることを願ってやまない。

(注1)

オペレーティングシステムとは、コンピュータを

動作させるための基本ソフトウェアと呼ばれるものの。

(注2)

CPU: Central Processing Unitの略で、コンピュータの心臓部分である各種の演算を行う部品。

(注3)

2003年1月25日、午後14:30分頃より、パソコン上のデータベースサーバを標的としたコンピュータウイルスが世界的にひろまり、国によって、インターネットの通信障害などが生じて、多くの被害を出した。

(注4)

しかしその後、非関税障壁にはあたらないとして、候補からはずされた。

参考文献

トロンプロジェクトホームページ

<http://www.tron.org/>

T-Engine プロジェクトホームページ

<http://www.t-engine.org/>

原稿募集について

i-Netに掲載する原稿を広く募集しております。

◆執筆要領

1. 原稿は、情報教育に関するオリジナルのものであれば、内容は問いません。
2. 字数は3000～7000字前後で、冒頭には、必ずタイトルをおつけください。
3. 原稿につきましては、以下にお送りください。なお、お送りいただく際には、お名前、連絡先（ご住所、電話番号、勤務先、メールアドレスなど）の記載を忘れずをお願いします。
*ワープロで原稿を作成された方は、データをFDなどにコピーして、コピーしたメディアと使用したワープロのファイル形式を記載して、ハードコピー（プリントアウトした紙）も一緒にお送りください。（FDなどのメディアは、後日ご返却いたします。）

◆原稿の送り先

〒102-0073 東京都千代田区九段北1-12-11 数研出版株式会社 東京本社編集部 i-Net 係

*掲載量には限りがございます。その際には、編集部で原稿を選択させていただく場合がございますので、ご了承ください。また、内容の趣旨が変更されない範囲で、原稿の一部を修正させていただく場合もございます。掲載させていただきました分につきましては、弊社規定の原稿料をお支払いいたします。