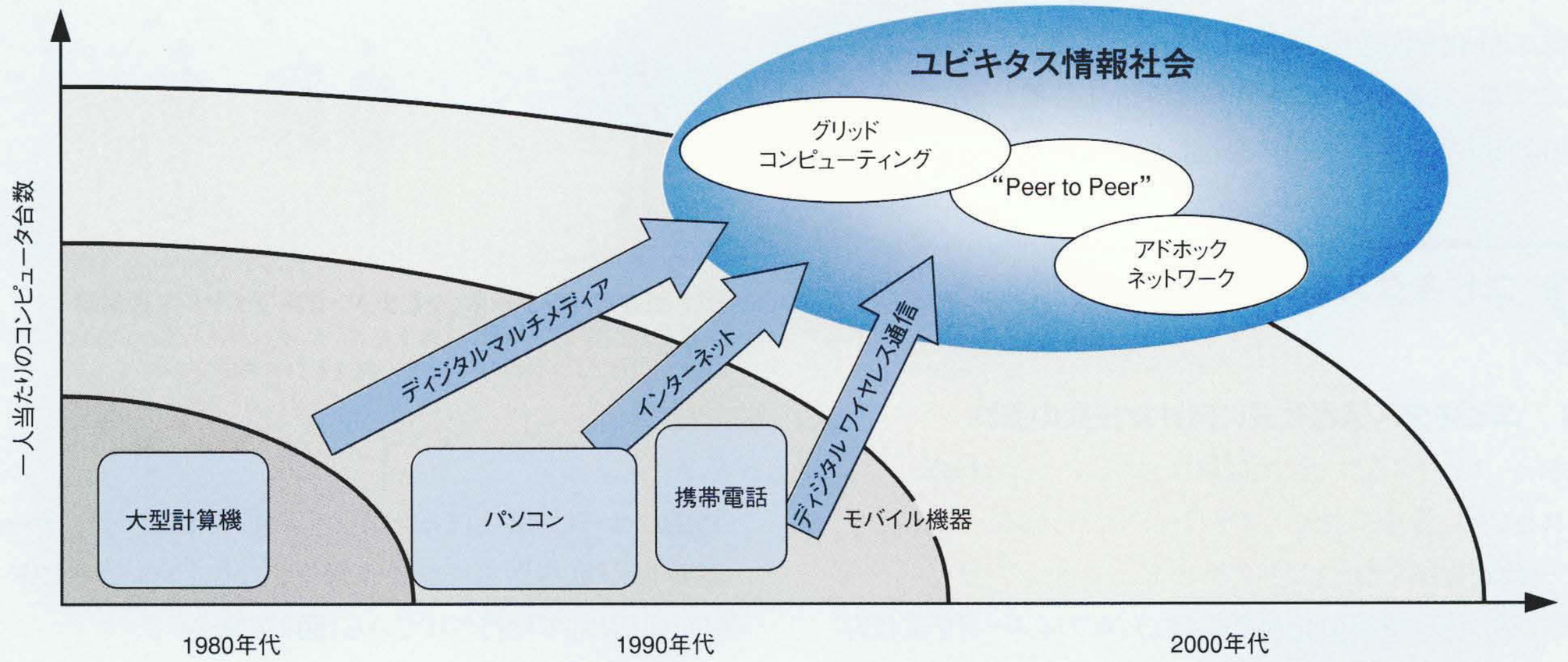
ユビキタス情報社会の実現に向けた半導体技術

Semiconductor Technologies Toward Ubiquitous Information Society

武田 英次 *Eiji Takeda*　矢野 和男 *Kazuo Yano*　鈴木　敬 *Kei Suzuki*



ユビキタス情報社会に至る技術の遷移

時代とともに一人当たりのコンピュータ台数が増加し，パソコンや携帯電話はだれでも所有できる状況にある。また，これらのハードウェアとともに，ディジタルマルチメディア，インターネット，ディジタルワイヤレス通信技術が発達し，融合しつつある。さらに，“Peer to Peer”技術をはじめとして，アドホックネットワーク技術やグリッドコンピュータ技術など，新しい技術をベースにしたユビキタス情報社会が出現する。

1台の計算機を多人数で共有して使う大型計算機の時代から，一人1台のパソコンの時代へと移行し始めた1990年ころに，「ユビキタスコンピューティング」の概念が提案された。提案者である米国ゼロックス社のマーク・ワイザー氏の定義を端的に言うと，一人が複数のコンピュータを利用し，それらの存在がユーザーから見えないこと（unconscious computing）である。その後，ユビキタスコンピューティングの概念は多くの人々に社会的・文化的な影響を与えながら，新しい技術を基に進化してきた。現在のIT関連産業のほとんど，すなわち，インターネットや携帯電話に代表される情報通信，自動車や家電の情報端末化，ヒューマンインタフェースなどは，すべて何らかの形でユビキタスという多くの人々の心をつかむ未来像（human intimacy）に向かっていると見られる。

この特集号の基調である“Peer to Peer”の概念は，従来の単純なクライアント・サーバモデルではなく，双方向の情報の流れを可能にし，人間の脳のネットワークにいっそう近づいている。そして，その進化を支えているエンジンは，言うまでもなく，「半導体技術」である。

1 はじめに

2002年は，後世，「ユビキタス（Ubiquitous）元年」と言われるようになると思われる。IT（情報技術）バブルの崩壊や同時多発テロの影響で，電子産業の成長は止まったかに見える。しかし，わが国では第三世代携帯電話サービスの競争が始まり，iモードに代表される携帯電話のインターネット接続サービスでも海外展開が始まった。パソコンの普及率は飽和しつつあるものの，ADSL（非対象ディジタル加入者線）などのブロードバンドサービスへの加入者は増加し続けており，世界市場での携帯電話の普及率は，中国を中心に依然として向上している。そして何よりも，10年前の米国ゼロックス社のワイザー氏の予言が正しければ，パソコンに取って代わる

「ユビキタスコンピューティング」が急成長するのも，ことしあたりからと考える。

学会もこれを後押ししている。電気・電子・情報分野最大の国際学会IEEE（米国電気電子学会）は，モバイルとユビキタスに関する新しい雑誌“IEEE Pervasive Computing”を創刊した（PervasiveもUbiquitousとほぼ同じ意味）。この分野が，学会での重要な一分野として認められたのである。

ユビキタスコンピューティングがここまで現実化した背景には，さまざまな技術の進歩がある。特に，半導体分野の技術の進歩が新しい電子機器の実現を支え，小型化・高性能化・低コスト化を促進してきた。

ここでは，これからのユビキタス情報社会像とともに，その実現に向けた半導体技術の動向について述べる。

2 ユビキタス情報社会

2.1 ユビキタス情報社会に向けた技術の流れ

現在，ユビキタスということばは「いつでも・どこでも・だれでも（だれとでも）・簡単に」というキーワードで語られる。これは，ワイザー氏が提案した「ユビキタスコンピューティング」がいっそう現実に近づき，技術の発展と多くの人々のイメージを重ね合わせた結果である。ユビキタス情報社会とは，さまざまな機器がネットワーク（インターネット）に接続し，どこからでも好きなときに，必要な情報や映像を引き出せる社会である。その際には難しい操作を必要とせず，だれでも簡単に使いこなせるようになるといったイメージが一般的である。このような社会を実現するための技術の流れについて以下に述べる。

この10年間の電子技術の進歩は，以下の三つの流れに分類できる。

（1） インターネット

異種コンピュータ間のメールシステムとして発達したインターネットは，WWW（World Wide Web）の技術と，家庭に普及したパソコンが端末となったことにより，爆発的に普及した。現在では，ブロードバンド（広帯域・高速）化が進み，Java言語※1）によるアプリケーション配信サービスや，映像を流すストリーミングサービスも発達してきた。これらの技術により，B2B（Business to Business：企業間）やB2C（Business to Consumer：企業―消費者間）あるいはC2C（Consumer to Consumer：消費者間）といったインターネットビジネスも出現した。

（2） ディジタルワイヤレス通信

ワイヤレス通信技術は，携帯電話の普及とともに急速に進歩した。「モバイル」や「ノマディック」は，ユビキタスにつながるキーワードでもある。通信のディジタル化により，携帯電話はモデム機能を内蔵し，ノートパソコンは無線情報端末となり，携帯電話自体のメール機能やインターネット接続機能（iモードに代表されるサービス）も大きく発達した。2001年にわが国で本格的なサービスが始まった第三世代携帯電話では，データ転送速度が毎秒数百キロビット以上になり，ブロードバンドモバイル通信として期待されている（**図1**参照）。

図1 現在のインターネットとディジタルワイヤレス通信網
現在，ディジタルワイヤレス通信網は，インターネットと融合している。このネットワーク上でディジタルマルチメディアが発達するのも間近である。

ここ数年，携帯電話以上に急速に発達したのが無線LANとBluetooth※2）である。無線LANは，2.4 GHz帯のIEEE802.11b規格と，無線LAN機器の相互接続を保証するWi-Fi規格により，オフィス用や家庭用LANとして普及し始めた。また，空港やコーヒーショップなどに，インターネットに接続した無線LANのアクセスポイントを設置する「ホット スポット サービス」も注目されている。一方，Bluetoothは，パソコンや携帯電話，ディジタルAV（Audio-Visual）機器など身の回りのディジタル機器を接続するPAN（Personal Area Network）規格として普及し始めている。

（3） ディジタルマルチメディア

DVD（Digital Versatile Disc）やディジタルテレビに代表される映像や音声のディジタル化技術では，MPEG-2（Moving Picture Expert Group 2），MPEG-4やMP3（MPEG-1 Audio Layer 3）などの規格ができ，新しく開発されるAV機器のほとんどがディジタル機器である。

以上の流れは，それぞれ別に発展してきた。しかし，ユビキタス情報社会という将来像から考えれば，完全な融合に向けて進化しているように見える。

※1） JavaおよびすべてのJava関連の商標およびロゴは，米国およびその他の国における米国Sun Microsystems, Inc.の商標または登録商標である。

※2） Bluetoothは，米国Bluetooth SIG, Inc.の商標であり，日立製作所はライセンス契約により，これを使用している。

2.2 文化を変える情報の流れ

それでは，ユビキタス情報社会が現実化するにつれ，どのような変化が起こるのか。

ユビキタス情報社会では，ひとりひとりが知らないうちに何台ものコンピュータを使うことになる。現在，携帯電話やカーナビゲーション システム，ディジタル ビデオ カメラなどの情報機器には必ずマイクロプロセッサが組み込まれている。つまり，すでに身の回りには何個ものマイクロプロセッサが存在している。しかし，それだけではユビキタス情報社会ではない。個々のマイクロプロセッサがネットワークに接続し，相互に連携したり，ネットワーク(インターネット)を通して世界中のリソース，あるいはその先にいる人間と連携したりするようになって初めて，ユビキタス情報社会となる。

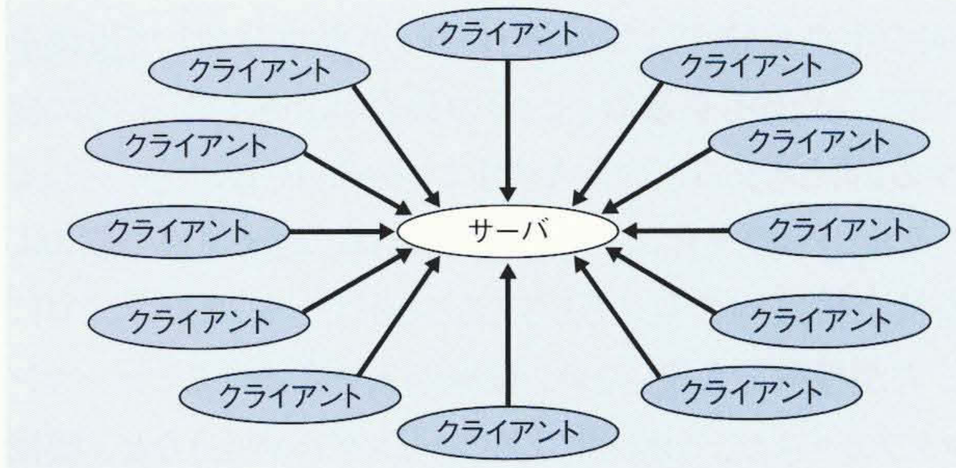
さまざまな機器をインターネットに接続するためには，ネットワークインタフェースを備えたマイクロプロセッサだけでは足りない。高度なネットワーク技術を，小さなマイクロプロセッサで実現する必要がある。まず，今後のネットワークの基盤となる技術がIPv6(Internet Protocol Version 6)である。従来のIPv4(IP Version 4)では，ネットワーク上に接続できる機器の数は43億個までであった。32ビットで表現するインターネット上のアドレス(IPアドレス)はあと数年で枯渇すると言われており，これを解決するために，128ビット(3.4×1,038個)分のアドレスを持つIPv6が開発された。その膨大さは，60億人(世界人口)がそれぞれ1兆個のアドレスを持ったとしても，まだ6×1,021個のアドレスで済むことからわかる。

もう一つ重要なのは，セキュリティに関する技術である。インターネットのようにオープンなネットワークでは，通信の傍受や他人への成り済ましなどを防ぐための暗号や認証の技術が必要になる。これらの基盤の上に，インターネット上に仮想的な専用ネットワークを構成するVPN(Virtual Private Network)などの技術が構築されている。

このような高度なネットワーク技術の中で，特に注目されているのがP2P(Peer to Peer)技術である。従来のネットワークシステムは，制御権を持ち，情報を与えるサーバと，それに従属するクライアントという二つの構成要素から成り立っていた。P2P技術では，サーバとクライアントという違いがなく，ネットワーク上ですべてが対等な関係になる(**図2**参照)。

インターネットではだれでもホームページを開設して情報発信できたが，それは一方的なものであった。P2P技術は，情報の流れを変える技術である。状況に応じて接続する相手を変え，一方的な情報の流れから双方向の流れを作り出すことができる。インターネットの発展が地球規模の「図書館」を作り出したのに対して，P2P技術は地球規模の共同作業を生み出す(**図3**参照)。今，盛んに研究・開発が進められている携帯端末を使った「アドホックネットワーク」や，空いているパソコンを有効に使って膨大な計算をするグリッドコンピューティング技術も同様のコンセプトに基づいており，ネットワーク革命の根幹を形成する技術である。また，これらの技術は人類の思考や文化を変える，21世紀の社会基盤を形成していくものと考える。

20世紀には，社会を支える産業は「工業化」から「情報化」，すなわち「アトム」から「ビット」へと移行した。そして，21世紀に



(a) クライアント・サーバ型ネットワーク

(b) P2P型ネットワーク

図2 クライアント・サーバ型とP2P型のネットワーク
クライアント・サーバ型では，サーバに情報が集中する。P2P型では，端末はサーバとしてもクライアントとしても機能する。

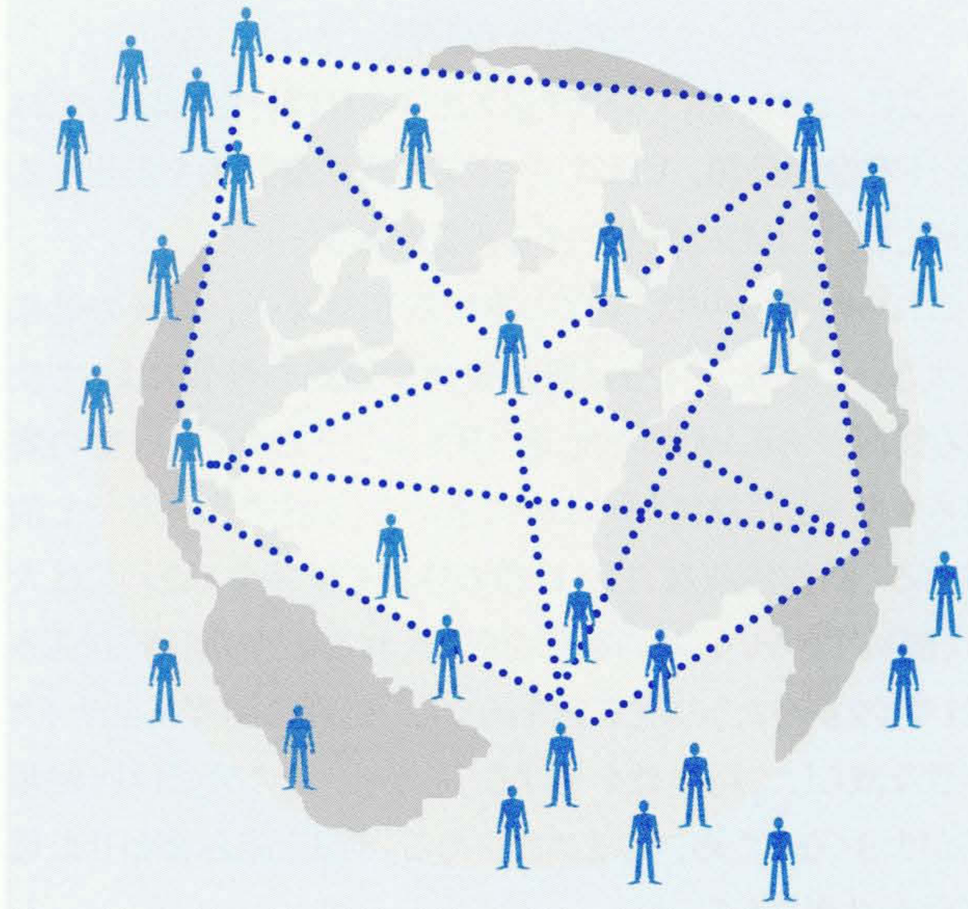


図3 P2P型のネットワーク
P2P技術とアドホックネットワーク技術により，国や地域，組織を越えてダイナミックな人のネットワークが広がる。

は，「ネットワーク化」が進む。ネットワークは，P2P技術により，従来の中央集権ではなく，それぞれが自律分散して役割を担う形，あたかも脳細胞（セル）の集合体が脳になるように変化するものと考える。この「A（アトム）」から「B（ビット）」，そして「C（セル）」への進化は，マクロに見れば，地球規模の脳のような社会構造への変化ととらえることができる。また，ミクロには，人が機械を意識しない，機械が人を意識するヒューマンインタフェースや，ロボットによるヒーリング（いやし）など，機械はいっそう人間に近い存在へと向かっている。この「A-B-C」という社会進化の中に，システムLSIが目指す方向がある。すなわち，今後のシステムLSIとそれを動かすソフトウェアは，人間社会の「脳」としての役割を担うと言っても過言ではない。

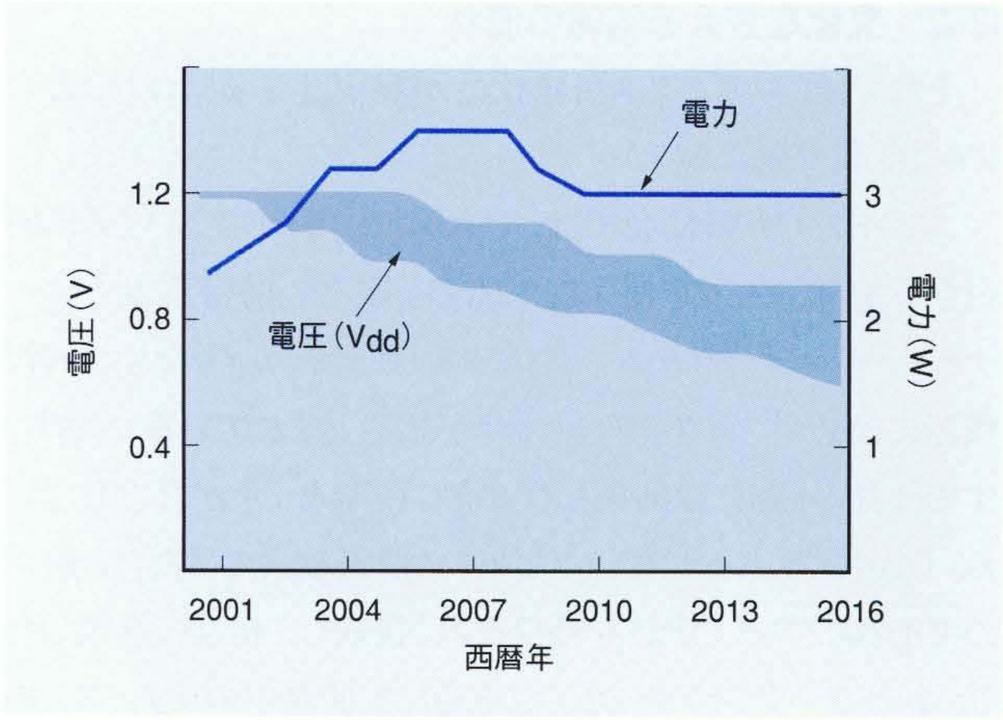


図4 電源電圧（V_{dd}）と消費電力のトレンド

国際半導体技術ロードマップが発表した低消費電力LSI（電池駆動）の電圧（V_{dd}）と電力のトレンドを示す。電圧は，動作電圧と待機時電圧で幅がある。

3 コアとなる半導体技術

3.1 モバイル機器を支える低消費電力技術

モバイル機器の普及は，ユビキタス情報社会に向けた一つの大きなステップである。現在，携帯電話やPDA（Personal Digital Assistant），ディジタル スチル カメラなど，持ち運び用途の機器は電池駆動である。電池駆動では，言うまでもなく，LSIの低消費電力化は必須である。

論理回路の消費電力Pは以下の式で与えられる。

$$P = a f C V^2$$

ここに，aは回路のスイッチング比率，fは動作周波数，Cはゲート容量の総和，Vは電圧である。低消費電力を実現するためには，これらの値を下げる必要がある。

これらの値の中で，Vは二乗であることから，削減の効果が大きい。一方，Cやaは回路規模や回路の性質によって決まる側面があり，大幅な削減が難しい。そのため，家庭の省エネルギーと同様に，「こまめに止める」手法を徹底させて削減する。動作周波数fは，目標の性能を維持するためには大きく削減できない。並列動作を取り入れるなどの回路のくふうで1サイクル当たりの演算量を増やし，処理に必要な総サイクル数を減らして周波数を下げる。しかし，その分だけ回路規模が大きくなるため，「こまめに止める」手法と組み合わせた最適化が必要になる。

一方，CMOS（相補形MOS集積回路）の論理回路では，電圧を下げると遅延が大きくなる。CMOS論理回路には，電源とグランド間にシリーズに接続したn形トランジスタとp形トランジスタが同時にオンにならないため，オンオフの切換がないかぎり非常に低消費電力であるという特徴があった。しかし，電圧を下げるとオン時に流れる電流が小さくなるので，遅延が増大する。この電流を大きくするためには，トランジスタのしきい値を低くすればよいが，そうすると，オフ時のリーク電流が増加する。回路の電圧を下げ，なおかつ十分な動作周波数を確保し，さらにリーク電流を抑えることが低消費電力化の課題になる。国際半導体技術ロードマップ（**図4**参照）でも，2016年までは電源電圧は下がり続け，動作時には0.6Vになると予想している。一方，電池駆動LSIの消費電力は3 W程度に抑えられると予想している。

日立製作所は，低消費電力化に向けて，低電圧時の課題を克服するための，以下のようなさまざまな技術を開発している。

(1) デバイス技術

低電圧時にもリーク電流を抑え，高速に動作するゲート長50 nmのSSC（Super Steep Channel）構造のCMOSデバイスを試作した。回路技術では，基板電圧制御と電源スイッチMOS（Metal-Oxide Semiconductor）などの技術により，サブ1 V（1 V以下）動作の低電圧化の製品化にもめどを立てている。さらに，日立製作所の基板バイアス制御技術と米国マサチューセッツ工科大学の電源電圧制御技術を用いて，0.1 V動作のCMOS回路技術も開発した。混載メモリ技術では，アレー微昇圧方式の0.4 V動作SRAM（Static Random Access Memory）と，超低リークを可能にするナノ構造トランジスタSESO（Single-Electron Shut-off）を用いたSESOメモリを開発した。

(2) アーキテクチャレベルでの低消費電力化技術

まず，動作しない回路モジュールの電源を各モジュールが自律的に遮断する技術を開発した。回路モジュールでも，各回路ごとに学習機能を持つことから，アプリケーションに合わせて電源遮断が最適化されるという特徴がある。さらに，チップの最大消費電力を管理する機構を設け，各回路モジュールの動作を制御し，最大電力を抑えるチップOS（Operating System）技術を開発した。これは，ソフトウェアを動作させるOSにより，メモリやCPUなどのリソースを管理する機構と同様の考え方で，消費電力制御を行う。これらの技術の評価実験では，LSIの消費電力をそれぞれ$\frac{1}{5}$と$\frac{1}{4}$に削減する結果を得ている。

(3) 画像などのリアルタイム処理技術

一定時間ごとにソフトウェアが処理する量に変動があることを利用し，ソフトウェアの処理量に応じて電圧と周波数を動的に変化させ，消費電力の最適化を図る技術を東京大学と共同開発した。ソフトウェアの処理量が多い場合は電圧を上げ，動作周波数を向上させる。処理量が少ない場合は電圧を下げ，動作周波数も下げることにより，必要な処理量に応じて消費電力を削減することができる。

3.2 ワイヤレスとセキュリティ

ユビキタス情報社会に向かう技術潮流の柱の一つがディジタルワイヤレス通信技術であることは，上述したとおりである。

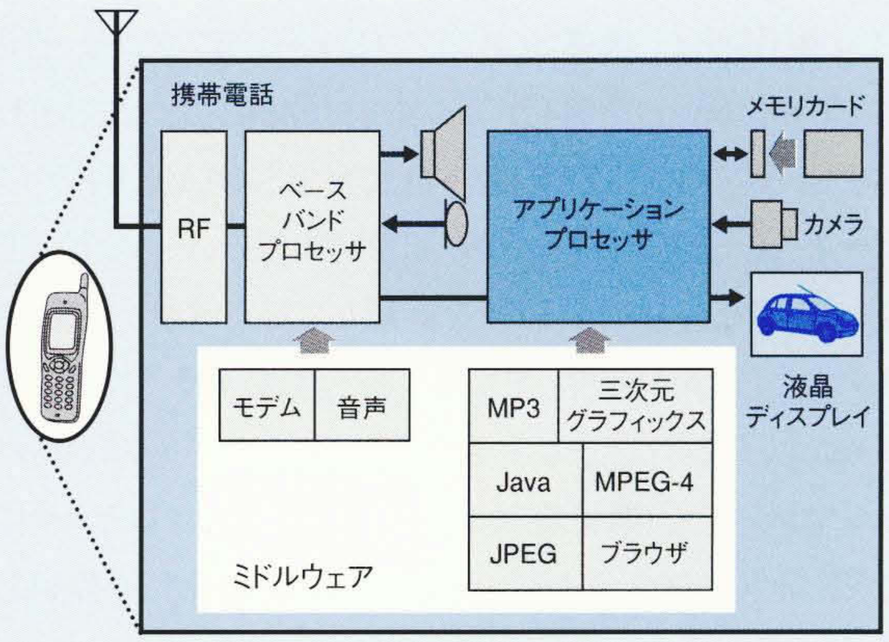
日立製作所は，低コスト・低消費電力で組込み用として，Bluetooth1.1対応のチップセットを開発した。このチップセットは，0.35 μmのSOI(Silicon on Insulator)BiCMOSプロセスを用いた無線周波数トランシーバLSI，64 MHz動作のSH-3コアマイコン，128 kバイトのRAMとUSB(Universal Serial Bus)などのインタフェースを搭載したベースバンドプロセッサから成る。SH-3コアマイコンはCPU能力に余力があり，音声・オーディオコーディックなど，ベースバンド処理以外の多様なニーズにこたえることができる。

一方，通信の発達とともに必須機能になっているセキュリティ技術に関しても技術開発を行っている。公開かぎ方式の暗号機能を内蔵したSecureMMC(MultiMediaCard※3)は，携帯電話での音楽配信サービスに利用され，コンテンツ保護や課金システム構築のキー技術となっている。また，モバイル機器利用の企業のために，個人認証(PIN:Personal Identification Number)によるセキュリティ管理が行える“PIN-SecureMMC”も開発している。MultiMediaCardは大容量フラッシュ メモリ チップを内蔵し，ディジタルカメラやPDAなどのモバイル機器向けのデータストレージが主要な用途である。MultiMediaCardは，セキュリティ技術により，有料コンテンツやモバイルコマースなどのサービス分野や，企業のモバイルシステムに応用が広がっている。

3.3 サービスを支えるメディア技術とソフトウェア技術

インターネットや携帯電話上のサービスは，多様化し始めている。携帯電話では，音楽や動画，ゲームなどのアプリケーションの配信サービスが始まっている。また，カー ナビゲーション システムを中心に，音声認識や音声合成の実用化も進んでいる。これらのマルチメディア処理を支えるのは，高性能なマイクロプロセッサとミドルウェアやマルチメディア処理用回路などのIP(Intellectural Property)である。日立製作所は，SuperHファミリのマイコンのアーキテクチャに沿ったコストパフォーマンスのよいプロセッサを開発し，さまざまなミドルウェアとともに市場へ供給してきた。

まず，携帯電話のアプリケーション向けには，Javaのバーチャルマシンや MPEG-4のコーデックのミドルウェアを提供している(**図5**参照)。また，カー ナビゲーション システム用には，コンパクトな大規模語彙(い)辞書を高速に参照する音声認識ミドルウェアや音声合成ミドルウェアのほか，三次元グラフィックスライブラリなどを提供している。



注：略語説明 RF(Radio Frequency)

図5 携帯電話のアプリケーションプロセッサの構成例

携帯電話のマルチメディア処理(動画，静止画，音楽再生，三次元グラフィックスなど)を行うプロセッサの構成を示す。

そのほか，SuperHマイコン向けにはMP3やAAC(適応オーディオコーディング)などのオーディオ圧縮方式やJPEG(Joint Photographic Expert Group)などの画像圧縮方式に対応したミドルウェア，インターネットアクセス用にTCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)のドライバやウェブブラウザなどを，日立製作所以外の企業からも供給している。OSに関しても，Windows CE※4)，ITRON(Industrial TRON)※5)，VxWorks※6)，Linux※7)などの主要な組込みOSに対応している。

4 ユビキタス情報社会に向けたLSIソリューション

ユビキタス情報社会に向けて，携帯電話やCIS(Car Information System)などモバイル情報機器の進歩が進ん

※3) MultiMediaCardは，独Infineon Technologies AGの商標であり，MMCA(MultiMediaCard Association)にライセンスされている。

※4) Windowsは，米国およびその他の国における米国Microsoft Corp.の登録商標である。

※5) TRONは，“The Read-time Operating system Nucleus”の略称で，東京大学の坂村健博士によって提案されたリアルタイムOS仕様である。

※6) VxWorksは，ウインドリバーシステムズの登録商標である。

※7) Linuxは，Linus Torvaldsの米国およびその他の国における登録商標あるいは商標である。

でいる。

日立製作所は，携帯電話のアプリケーションプロセッサとして，“SH-Mobile1”を開発した。SH-Mobile1は，133 MHzのSH3-DSPをコアに，128 kバイトの大容量SRAMとカメラインタフェース，カードインタフェース，USBインタフェースなど，携帯電話に必要な各種の周辺IPを搭載しているほか，約5 μAの低スタンバイ電流も実現している。また，QCIFサイズで毎秒15フレーム以上の性能を持つMPEG-4エンコードやJavaバーチャルマシンなど，携帯電話のアプリケーションプロセッサに必要なミドルウェアを，SH-Mobile向けに最適化して提供している。

また，カーナビゲーションで実績のあるグラフィックスプロセッサ“Q2”とスーパスカラ，高性能な浮動小数点演算でグラフィックス処理に向いた，SH-4をコアとしたCIS端末用のシステムLSIソリューションを提供している。

SH-MobileやCIS用の製品ではシリーズ化を図り，さまざまなニーズにこたえるソリューションを提案していく考えである。

5 おわりに

ここでは，ユビキタス情報社会に向けた技術開発の潮流と，このような情報社会を支える半導体技術の動向について述べた。

ユビキタス情報社会に向けて，インターネット，ディジタルワイヤレス通信，およびディジタルマルチメディアの大きな三つの技術の流れが相互に影響し合い，融合し，着実に進歩している。半導体技術は，それらの進歩を支える大きな要素である。

ユビキタス情報社会で重要となるP2P技術などのネットワーク技術は，近いうちにマイクロプロセッサ上に実装され，携帯電話などの情報端末もサーバとクライアントの両方の機能を持ち，しかもその存在が意識されない“unconscious”なコンピューティングパワーを持つことになるものと予測する。

一方，ここでは述べなかった技術の流れ，例えばロボットは，単なる自律機械ではなく，高度なヒューマンインタフェースと位置づけることができる。ヒューマンインタフェースは，ユビキタス情報社会における重要なテーマでもある。

日立製作所は，今後もユビキタス情報社会の将来像をユーザーと共有し，技術開発を進め，常に新たなソリューションを提案していく考えである。

参考文献など

1) M. Weiser:The Computer for the 21st Century, Scientific American (Sept. 1991)
2) IEEE:Pervasive Computing—Mobile and Ubiquitous Systems, Vol.1, No.1 (Jan. 2002)
3) 野村総合研究所:ユビキタス・ネットワークと市場創造 (2002.1)
4) A. Dornan:用語で知る携帯通信とモバイルの世界 (2002.4)
5) 坂村:ユビキタス・コンピュータ革命 (2002.6)
6) http://www.hitachisemiconductor.com/sic/jsp/japan/jpn/Sicd/Japanese/Products/system/middleware/01_d.htm
7) ITRS:International Technology Roadmap for Semiconductors 2001 Edition, Executive (2001)
8) T.Yamada, et al.:A 133 MHz 170 mW 10 μA Standby Application Processor for 3G Cellular Phones, ISSCC2002, 22.3 (March 2002)
9) K.Aisaka, et al.: Design Rule for Frequency-Voltage Cooperative Power Control and Its Application to an MPEG-4 Decoder, Symposium on VLSI Circuits 2002 (June 2002)

執筆者紹介

武田英次

1975年日立製作所入社，半導体グループ 所属
現在，半導体技術全般の技術開発戦略の企画に従事
工学博士
電子情報通信学会会員，応用物理学会会員，電気学会会員
IEEE会員
E-mail：takeda-eiji @ sic. hitachi. co. jp

鈴木　敬

1989年日立製作所入社，中央研究所 システムLSI研究部 所属
現在，ユビキタス情報社会向けシステムLSIの研究に従事
工学博士
電子情報通信学会会員，情報処理学会会員，電気学会会員
IEEE会員，ACM会員
E-mail：mailto:ksuzuki @ crl. hitachi. co. jp

矢野和男

1984年日立製作所入社，中央研究所 システムLSI研究部 所属
現在，最先端システムLSIの研究・開発に従事
工学博士
電子情報通信学会会員，応用物理学会会員，IEEE会員
E-mail：k_yano @ crl. hitachi. co. jp