

珪石器文明（情報通信技術）と人間

井上靖秋

東亜大学 総合人間・文化学部 情報・自然科学教室
E-mail: inoue@po.cc.toua-u.ac.jp

草信佐栄子

東亜大学 総合人間・文化学部 情報・自然科学教室
E-mail: kusanobu@po.cc.toua-u.ac.jp

鍛治永悟

東亜大学 総合人間・文化学部 情報・自然科学教室
E-mail: kaji@po.cc.toua-u.ac.jp

堀内和夫

東亜大学 総合人間・文化学部 情報・自然科学教室

1. はじめに

新世紀と新千年紀の到来を祝うエンジニアたちは過去数百年にわたる驚異的な科学技術の進展に誇りをもつべきである。あの幌馬車や初めての電話とラジオから、最新の携帯電話、GPS、インターネット、そして惑星間宇宙船に至るまで、この間の科学技術の進展は全く驚きの連続であった。しかし、このような栄光に満足することなく、エンジニアたちは更なる偉大な離れ業に取り組んでいる。即ち、人間と対話する自動車、飛び回る人工昆虫、人間に似た感情をもつロボット、ヒトゲノムの完全なマップなどである。これは権威ある世界最大の電気・電子学会が発行する学会誌特集号の一節（Geppert & Sweet 2000）であるが、人類が創生した文明の発展には目覚しいものがある。

いま世の中は情報社会とか、マルチメディア社会とかとよばれ、また、マスコミの報道ではIT革命という言葉がさかんに使われている⁽¹⁾。それを具体的に実現する技術という側面から、ときには、デジタル技術革命とか、マイ

クロエレクトロニクス革命などともよばれる。また、そこで用いられるキーデバイスの主要素材という側面から、珪石器（シリコン）文明とか珪石器時代という言葉も使われてきた。こういった言葉が示すように、われわれはまさに前代未聞の科学技術の驚異的な発展が引き起こす革命の真っ只中にいるのである。

総合人間・文化学部は、2000年度の新設で、学問分野の枠を越えて総合的に人間を捉え、新世紀への指針を探る学部である。基本的には広い意味の人間科学・社会科学を専門の学術分野とするものであるが、その大きな特徴の一つは人工言語（情報処理）が扱える「人間学」学士の育成を謳っていることである。21世紀の新しい指針を考える上では、前世紀に飛躍的に発展し新世紀に更なる発展が見込まれて新たな文明をもたらす自然科学、なかでも情報通信技術（ICT）を軽視することなどできないからである。

学部紀要の創刊特集号発行にあたり、新世紀の人間・文化にかかわる諸問題に正面から取り組むために、学部の中における情報・自然科学教室の位置付けと役割について、ふだん考えて

きたことをここでまとめてみたい。以下本稿では、まず準備として、20世紀の科学技術の発展（近代文明からIT革命に至る発展）とその特徴について、キーテクノロジーでかつ筆者らの専門分野であるマイクロエレクトロニクスの観点から解説する。次に、その技術革新がもたらす21世紀の文明社会について、関連分野の専門家の予測も踏まえて、大胆な予測を試みる。最後に、学部における情報・自然科学教室の役割について述べる。

2. 20世紀の科学技術（マイクロエレクトロニクス）の発展

IT革命をもたらした今日の科学技術の進展を支えてきた重要な基盤技術は、何と言ってもマイクロエレクトロニクスの技術である。即ち、トランジスタの発明とその理論、集積回路の発明とその微細加工技術などからなる、シリコン（珪素）を素材とする技術革新、いわゆる珪石器文明である。21世紀のITの発展もひとえにこの技術の進展にかかっている。今日のIT革命を支えてきた技術、なぜ驚異的な進展が可能だったのか、そして、それはいつまで続くのか、これらを知るための鍵は、この珪石器文明（マイクロエレクトロニクス）にある。ここではまず、この文明の誕生から今日までの発展の流れについて解説する（山崎・木本 1976、久保脩二 1989、Lucent Technology 1997）。

2.1 珪石器時代の始まり：トランジスタの発明

20世紀の近代エレクトロニクスは欧米を舞台にして、マルコーニの大西洋横断無線通信の成功（1901年）、フレミングの2極真空管の発明（1904年）、ドゥフォレストの3極真空管の発明（1906年）によって幕が開いた。それ以来、第2次大戦終了までの約50年間、無線通信分野を中心に真空管の時代が続いた。しかし、真空管には発熱、寿命、容積等で大規模システムに応用するには問題があった。

その後、舞台はほとんど米国に移ることになる。ベル電話研究所では、1935年から真空管

と同じ働きでその欠点を改良する装置を固体結晶で作るという固体増幅器の研究を開始していたが、いくたびとなく繰り返された試みは全て失敗に終わっていた。そのために物理学の遅れに注目して、ショックレイをリーダとする半導体の表面現象の研究グループが1945年に結成された。そして1947年12月、バーディーンとブラッテンによって半導体の基礎理論の実験（表面準位の仮説の検証）中に、その副産物として固体による増幅作用が偶然発見され、歴史的なトランジスタの発明に結びついた。このトランジスタは図1のような構造から点接触形トランジスタとよばれている（Bardeen & Brattain 1948）。

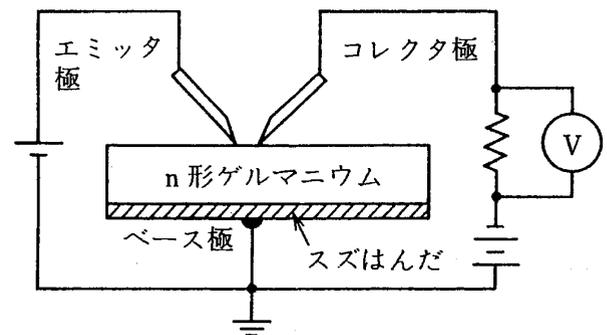


図1 点接触形トランジスタの構造

（注）n形ゲルマニウム基盤（ベース）に2本の針状電極を接触させて、一方の電極（エミッタ）から電流担体を注入すると、その変化分が他方の電極（コレクタ）に伝えられる。即ち、エミッタを入力端子、コレクタを出力端子として、増幅作用が現れる。しかし、点接触構造のために構造的にもろく、量産に不向きであった。（出所）久保脩二（1989）

その翌年の1948年、ショックレイによりトランジスタの動作メカニズムを解明するPN接合理論が完成され、新たに接合形トランジスタ（図2）が発明された。これらを集大成した論文（Shockley 1949）は、今日の半導体の基礎理論をなしている⁽²⁾。

ショックレイの理論をもとに、1952年にGE社で、翌年RCA社で、量産に適した構造をもつ合金接合形トランジスタが開発された。このトランジスタは日本の半導体産業と電子産業（当時ラジオを生産）の立ち上げに大きく貢献した⁽³⁾。

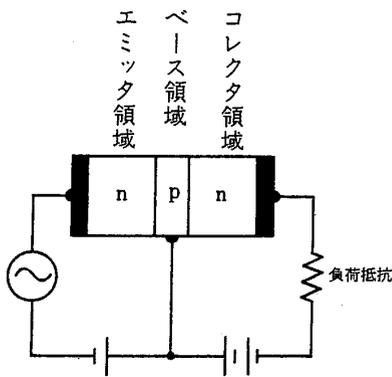


図2 接合形トランジスタの構造

(注) ショックレイが特許出願したトランジスタで、点接触形トランジスタの動作原理を説明する中で発明された。薄いp形領域(ベース領域)の両端に2つのn形領域(エミッタ領域、コレクタ領域)を形成して、2つのpn接合からなるnpnのサンドイッチ構造をしている。構造的に堅牢で、量産に適している。

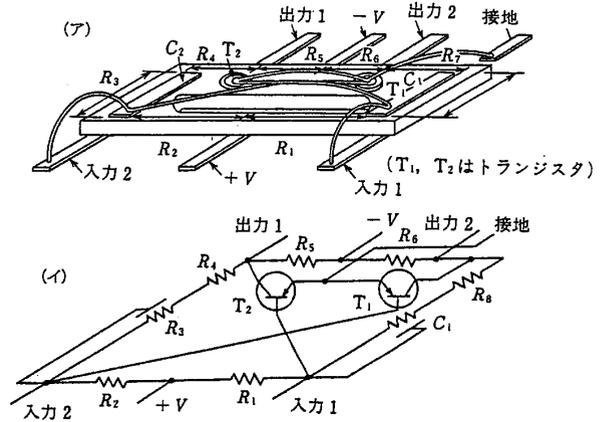
(出所) 久保脩二 (1989)

トランジスタはその後、応用分野を急激に拡大して今日に至り、その理論は集積回路の発明に結びついていった。珪石器時代の基盤をはこうしてつくられた。

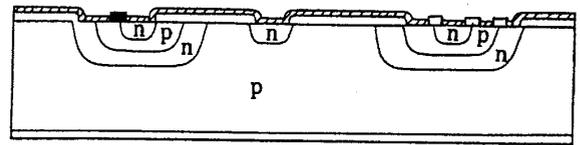
2.2 素子から回路へ：集積回路の発明

トランジスタの発明から今日の集積回路に至るまでに更にいくつかの重要な発明がある。まず、TI社キルビーによるモノリシック集積回路の発明(1958年)、これは図3(a)に示すように一つの半導体基板上に回路を形成するというものである。単なる回路素子(トランジスタなど)でなく、複数の素子からなる回路を単一基板上に形成するという、モノリシック集積回路の概念がここで初めて示された(4)(Kilby 1976)。今日の集積回路はこの概念に基づいて作られている。つづいて、FC社のノイスとムーアによるプレーナプロセス(1959年)とノイスの集積回路(同年)の発明、これらは図3(b)に示すように半導体基板結晶の同一平面上に回路素子と配線を形成する技術で、キルビー特許と並んで集積回路発展の基礎となる画期的な技術である(Noyce 1961)。

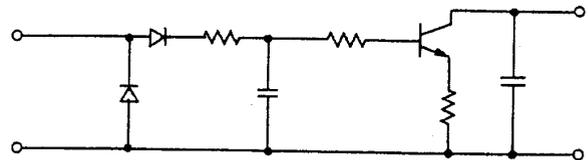
当時はまずこの構造を用いて(接合トランジスタを主構成要素とする)バイポーラ型とよば



(a) キルビー特許に記載されたマルチバイプレータの構成図



(b) 構造



(c) 等価回路

(b) ノイスにより特許出願された半導体デバイスと接続の構造に関する特許

図3 キルビー特許とノイス特許

(注) (a)キルビー特許に記載されたマルチバイプレータの構造図(b)とその回路図(c)。半導体基板上に形成されたトランジスタ(T)、抵抗器(R)、キャパシタ(C)が、細いワイヤーで接続され回路を構成している。(b)ノイスにより特許出願された半導体デバイスと接続の構造に関する特許で、その構造(b)と等価回路(c)。半導体基板上に形成されたトランジスタ、ダイオード、抵抗器、キャパシタが、蒸着技術で基板上に一括形成した金属層によって接続されている。

(出所) 久保脩二 (1989)

れる集積回路(図4(a))が開発され、その最初の製品は1961年に軍関係、翌年に航空宇宙局に納入された。更に、市販品としては電子計算機に大量に使用され、この時点から集積回路産業が本格的に立ち上がった。その後、1965年から演算増幅器、ラジオ用集積回路、テレビ用集積回路などが開発され、家電製品の普及に貢献した。

更に、1959年ベル電話研究所のカーンとア

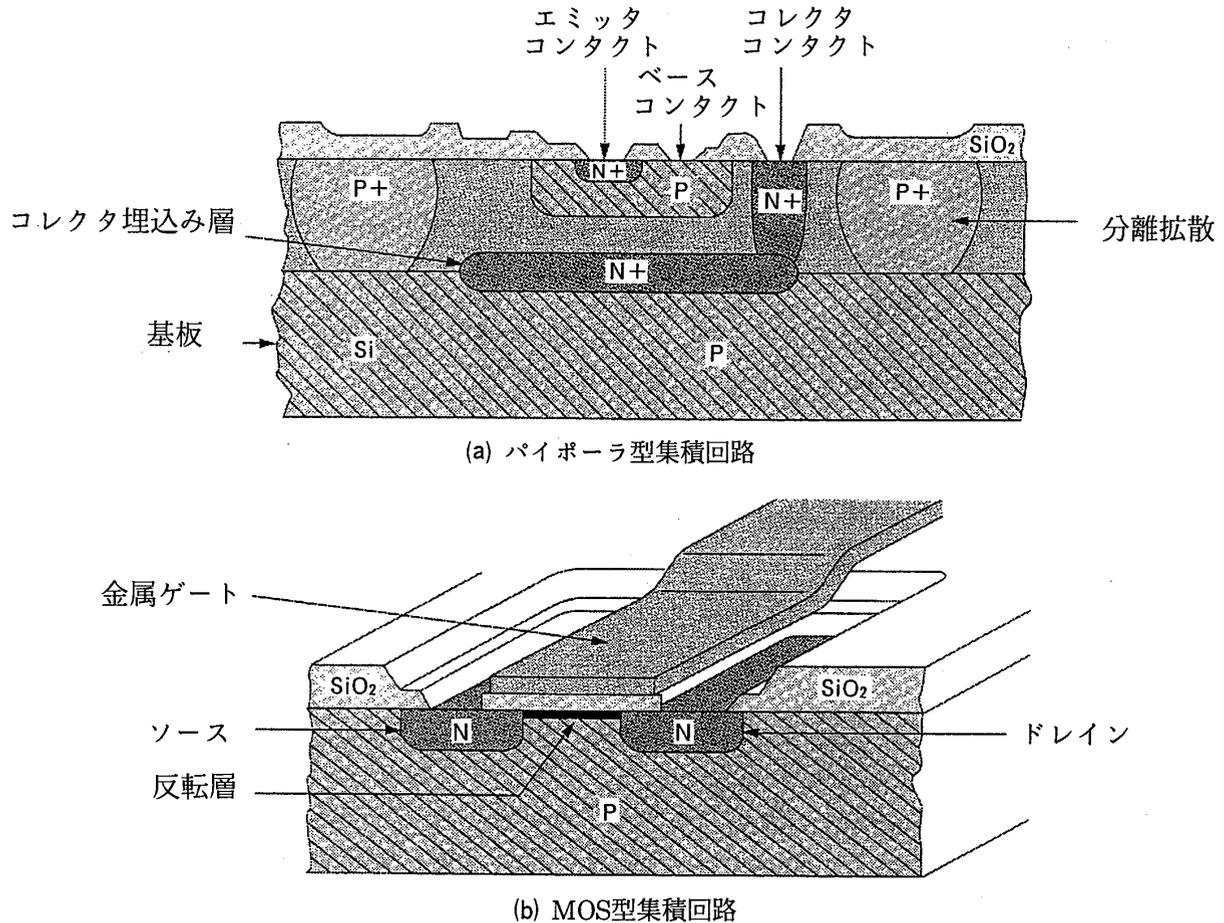


図4 バイポーラ型集積回路とMOS型集積回路

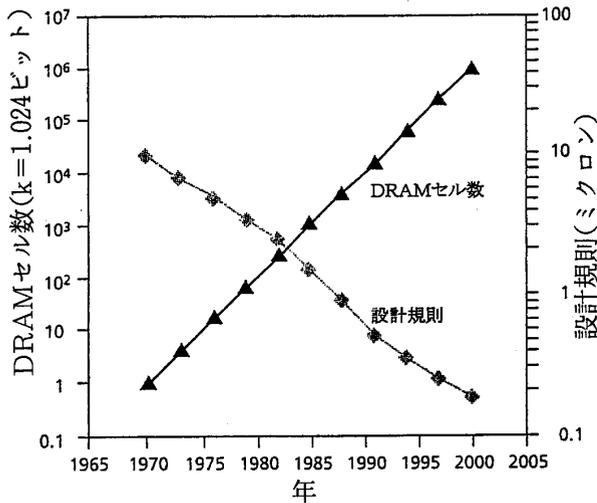
(注) (a) 典型的なバイポーラ型集積回路の断面構造で、P形シリコン基盤上にトランジスタが形成され、P+領域で素子分離されている。(b) 典型的なMOS(金属酸化膜半導体)型集積回路の断面構造で、P形シリコン基板上に形成されたソース・ドレイン各領域間の電流通路(反転層)を薄い絶縁層(シリコン酸化膜 SiO_2)を介して金属ゲートの電圧で制御する。

(出所) Lucent Technology (1997)

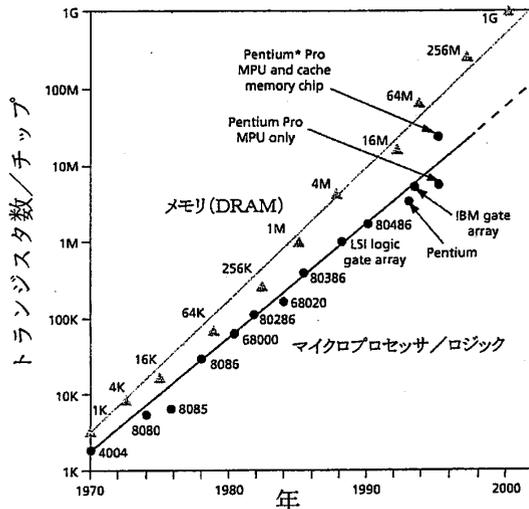
タツラによって、ショックレイらが当初目指していた固体増幅器である絶縁ゲート型の電界効果トランジスタ(IGFET、MOSFETともよばれる)が発明された。続いて、1963年にはカニングらによって、このMOSFETを主構成要素とするMOS型集積回路(図4(b))が開発された。今日のIT革命の主役となっているMOS型集積回路はこうして生まれて発展したものである。1971年に発明されたマイクロプロセッサは、MOS型集積回路の技術を用いて一つのシリコン小片(これをチップとよぶ)上に実質的にコンピュータを作るというもので、それはトランジスタの最も進化した応用製品といえる。

2.3 微細化技術の驚異的發展：ムーアの法則

集積回路はその後、構成素子の微細化による大規模(高密度)集積化への道をひたすら歩むことになる。その微細化(スケールリング)の進展速度を表す指標としてムーアの法則(図5)とよばれるものがある(Moore 1975)。これは1970年代にインテル社のムーアが過去のトレンドから発見したMOSトランジスタの経験的スケールリング則で、微細化による集積度は1.5年から2年で2倍の割合で(即ち、3年から4年で4倍の割合で)、また、マイクロプロセッサの性能も同様の割合で、指数関数的に向上するというものである。更に、この法則の「系」として、機能当たりのコスト(1トランジスタ当たりのコスト)は年率29%の割合で低減す



(a) DRAM容量と最小加工寸法の推移



(b) 集積回路内蔵トランジスタ数の推移

図5 ムーアの法則

(注) 集積回路の最小加工寸法(設計規則)と1チップ上に搭載可能な素子規模の増大は、片対数グラフにプロットすると、ほぼ直線上に乗る。即ち、指数関数的に推移する。(a)DRAM容量(セル数)は4倍/3年の割合で、この30年間で百万倍(10⁶倍)に増大した。それは、設計規則の微細化などによる。(b)集積回路内蔵トランジスタ数も同様に推移し、2000年ではメモリ関連で10億(1G)個、マイクロプロセッサで1億個のトランジスタを内蔵するレベルに達している。

(出所) Lucent Technology (1997)

るといふものがある。この法則はマイクロエレクトロニクス及び関連産業のマクロトレンドとして、また、先端技術開発の重要な指標として、歴史的に実証されている⁽⁵⁾。もちろん、こ

れは物理学、設計技術、製造技術の絶え間ない革新を通して達成されたものである。トランジスタの発明以来わずか50年余りのうちに、マイクロエレクトロニクス産業は半導体結晶の単一チップ上に搭載されるトランジスタの数を何と1億倍に増大させた。即ち、10⁸倍という科学技術と人類史上比類ない驚異的な生産性向上を成し遂げているのである。

このようにして、20世紀の半ばに繰り広げられたトランジスタの発明は、真空管に替わる固体増幅器とスイッチを作るというベル電話研究所の当初目的を達成したばかりか、その後、驚異的な進展を続けて超大規模集積回路へ進化して、今日の情報通信技術の発展をもたらしたのである。

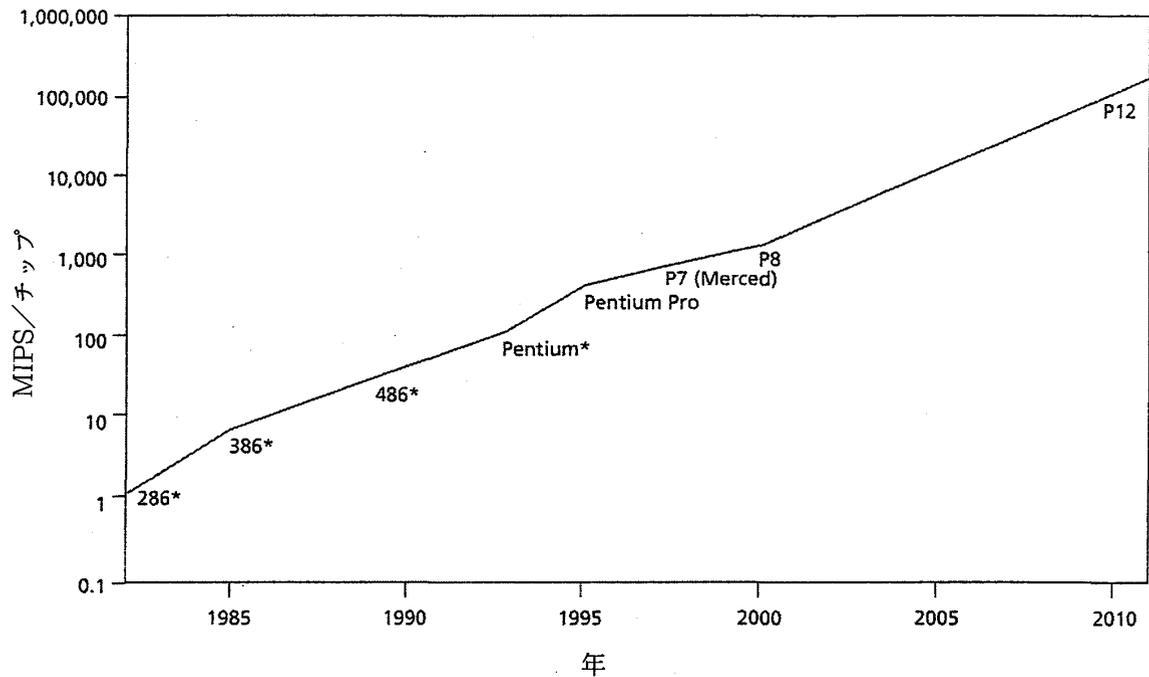
2.4 マイクロエレクトロニクスが情報通信技術に与えた影響

現在の集積回路産業は、地球上の人類一人当たり数千トランジスタを毎日生産しており、総額24兆円の販売規模(2000年度)に達している。その市場は、大別して、メモリ集積回路(DRAM/SRAM/NRAM)、ロジック集積回路(マイクロプロセッサ、DSP、カスタムロジック)、アナログ集積回路などからなる。集積回路のテクノロジードライブとその応用市場は主としてデジタルの舞台にある。われわれのアナログの世界から取得されたデータは直ちにデジタルデータに変換され、デジタルデータは計算、圧縮、伝送、保存、そして誤り訂正が容易で、必要ならアナログ信号に再変換することも容易であるので、信号の処理や伝達がデジタルの世界で行われるようになったからである。これを妥当なコストで実施できるようにしたのが超大規模集積回路の技術である。

トランジスタはすべての情報通信システムで重要なブロックを構成する役割を果たしてきた。集積回路技術の進展により、サイズ、コスト、性能、更に、消費電力といった各特性の改良が継続的に行われ、システムの小型化、高性能化、高機能化、低価格化、低消費電力化を実現してきている(図6)。現在では、1チップ

上にシステムをすべて搭載する (System on a Chip、SoC とよぶ) システム LSI も実現して

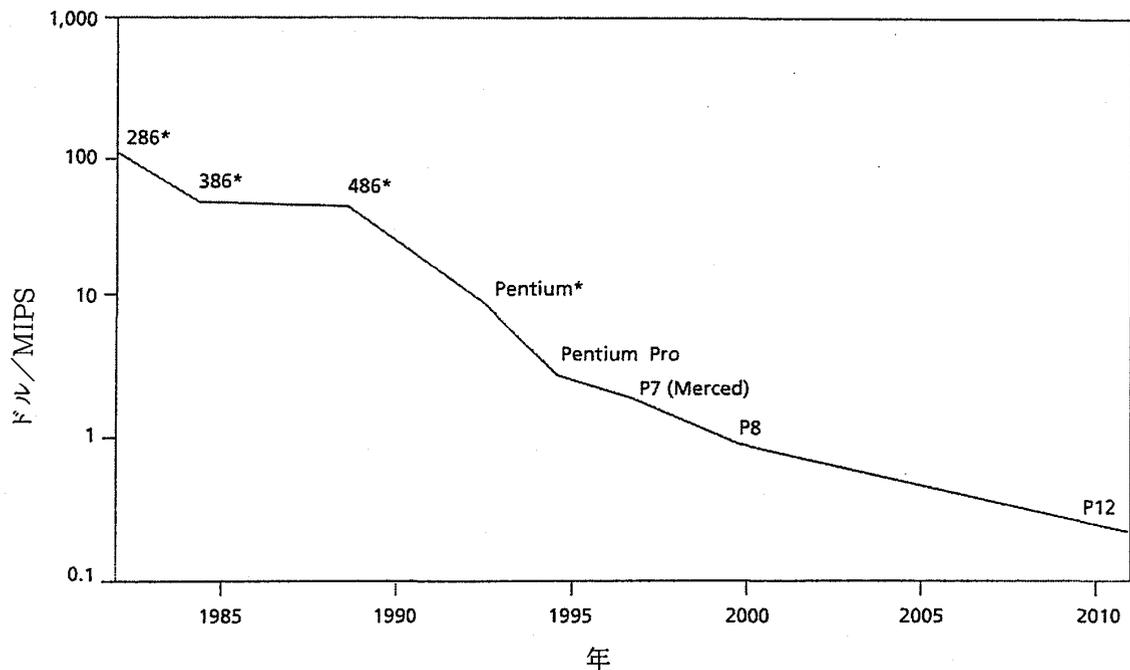
いる。これにより、ソフトウェア、ハードウェア、アーキテクチャーの各方面から革新的な改



MIPS - Millions of instructions per second

* Pentium, 286, 386, and 486 are registered trademarks of Intel Corp.

(a) MIPS/チップの増大



MIPS - Millions of instructions per second

* Pentium, 286, 386, and 486 are registered trademarks of Intel Corp.

(b) 計算パワーコストの劇的低減

図6 コンピュータ性能の驚異的向上

(注) (a) 1チップマイクロプロセッサの性能 (MIPS) はこの18年で1000倍に増大している。(b) これにより、計算パワーのコスト (ドル/MIPS) は同1/100と劇的な低減を果たしている。

(出所) Lucent Technology (1997)

良を適用することができて、情報通信システムの性能を飛躍的に向上させてその可能性を拡大することができた⁽⁶⁾。

今日の PC (パーソナルコンピュータ)、インターネット、携帯電話に代表される情報社会は、マイクロエレクトロニクスの技術をもってはじめて実現したのである。即ち、トランジスタの発明を起源として今日の集積回路に至る、いわゆる珪石器文明が今日の豊かな情報時代を創ったといっても過言ではない。その特徴は、一言でいえば、ムーアの法則で示されるように、脅威的、継続的、かつ急激な進展にある。その技術革新は、少なくとも、鉄、蒸気機関、産業革命に匹敵する大きな影響を社会に与え、人類史上のほかのいかなる技術革新と比較しても、より多く人知を高め、人類を骨折り仕事と無知から解放してきた。しかもその情報時代はまだほんの幼年期の段階にある。

3. 情報通信技術の更なる発展はどこまで行くか

20 世紀に飛躍的な進展を遂げた集積回路技術であったが、果たして今後もそのような継続的進展が可能なのかどうか、まず、これについて解説する。次に、その集積回路技術の進展から予想される 21 世紀の情報社会の一端を展望する。

3.1 集積回路技術の展望

情報社会が健全な発展を続けるためには、しっかりした技術基盤が築かれていなければならない。もちろんこれからも集積回路の技術は進展するが、ムーアの法則に従った今後の継続したスケーリングに対して、その限界がぼんやりと見え出している。ここでは、今後の集積回路技術の微細化の方向、その際の障害と解決策、また、微細化の究極の限界について解説する(Lucent Technology 1997, 矢野他編 1998, Geppart Ed. 1999, SIA 1999, Geppert & Sweet Ed. 2000)。

集積回路の技術がムーアの法則に従って 4

倍/3年(2倍/1.5年)というペースの世代交代で進展できたのは、プロセスの微細化(設計規則による効果 $\sqrt{2}$ 、面積効果で2)に加えて、チップサイズの拡大や製造プロセスと設計のあらゆる局面での技術革新(効果2)が達成できたからである。一方、チップ1cm²当たりの製造コストは1970年代と同等に維持してきている。これは、ウェーハの大口径化による生産性向上と製造歩留まり向上による。もちろん、今後も無限に微細加工技術が進められる訳ではなく、いずれ物理的な限界に突き当たることになる。

現在、メモリ集積回路では128Mビット DRAMが、また、微細化プロセスでは0.18ミクロンプロセスが量産段階にある。次世代の技術、0.13ミクロンプロセスは開発段階、次々世代、0.10ミクロンプロセスは研究段階にある。

ムーアの法則が示す直線上で生き延びるうえで現在想定される破局は、デバイス(トランジスタなど)の寸法が小さくなることによって、製造ばらつきの制御が原子のスケールに急激に近づいていることである⁽⁷⁾(図7)。0.1ミクロン以下の微細加工では、多くの課題を解決せねばならないが⁽⁸⁾、デバイスや回路のアーキテクチャーに関する課題もさることながら、製造工程で寸法を刻むリソグラフィ技術が主要な課題となろう。加工寸法がついに露光装置で用いられる光源の波長(回折現象)によって規定される解像限界を下回るようになるからである。この点は2008年に生産導入が見込まれている0.07ミクロンプロセスのいくぶん前に起きると予想されている。従来のレーザー光源に替わるリソグラフィ技術の開発が必要になるが、その有力候補として、より短波長のX線や電子ビームを用いたリソグラフィ技術が研究されている。

ムーアの法則のトレンドから想定されるこのような将来の様々な課題に対して、各専門分野のエキスパートがその解決に向けて果敢に取り組んでいる。デバイス寸法の究極の限界は現在のところ0.05ミクロン程度と考えられているが、新たな原理に基づく更なるブレイクスルー

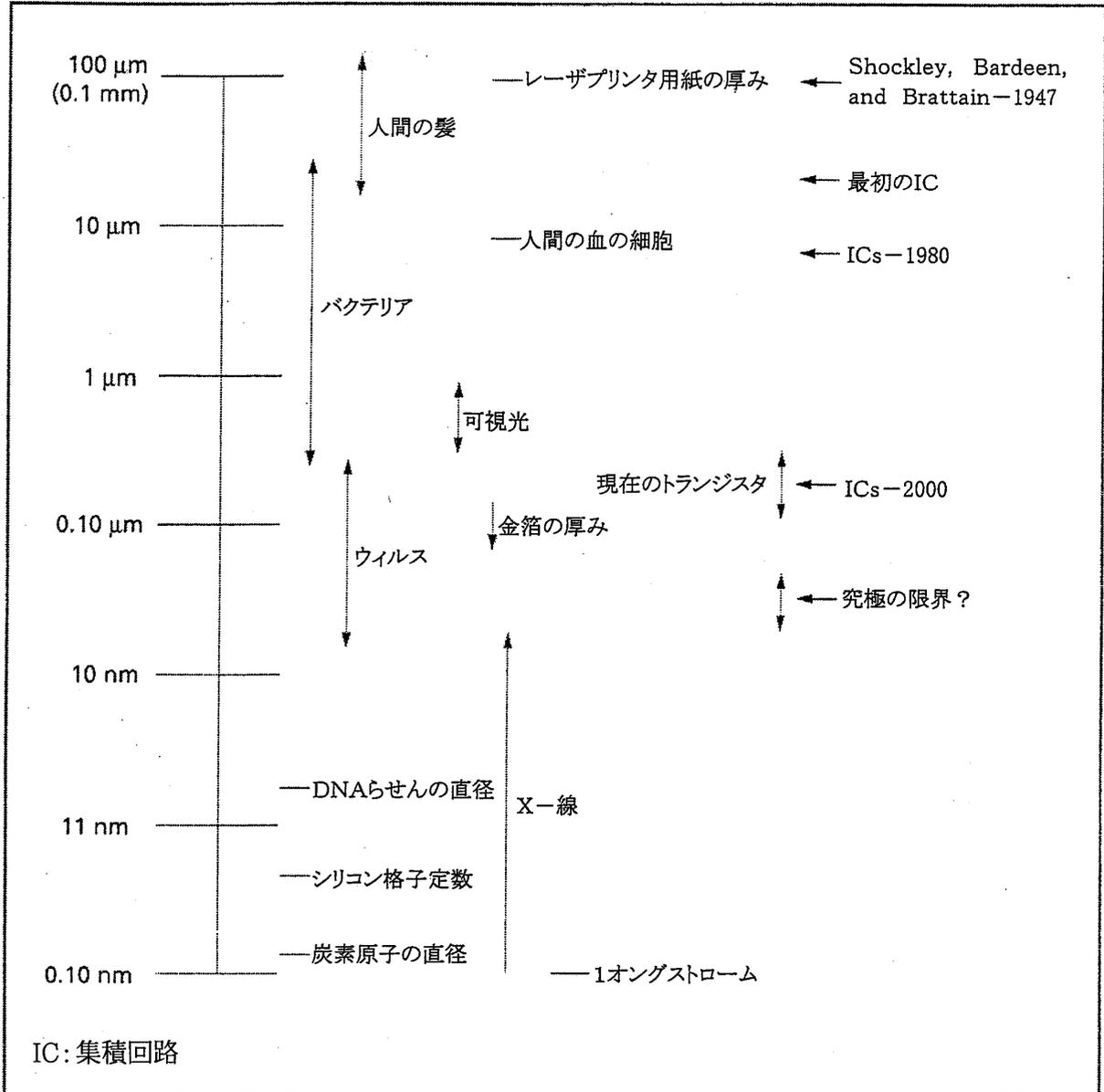


図7 限界に近づくデバイスサイズ

(注) 発明当時のトランジスタの寸法は約75ミクロンであった。2000年現在の典型的な集積回路のトランジスタの設計規則は0.18ミクロンであるから、加工寸法はこの間1/420に縮小した。設計規則の究極の限界は更に1/3.6縮小した0.05ミクロンと現時点では考えられている。しかし、更なるブレークスルーが起きると確信して、研究が進められている。

(出所) Lucent Technology (1997)

(たとえば、量子効果デバイス) が起きると信じて研究が進められている。現時点の一つの予測としては、これまでの数十年間で見られたと同様な度肝を抜くような継続的技術進展が、少なくとも2010年代半ばころまで続くと見られている⁽⁹⁾。

3.2 社会はどのように変わるのか

情報社会はまだ始まったばかりで、現在の技

術と今後の技術革新を踏まえて将来を想定すると、現在われわれが目にはしているのはほんの氷山の一角に過ぎない。これからの社会を考える上で関心の高いのは、産業と経済に関すること、更に、身近な家庭、オフィス、教育などに関することである。ここでは、マイクロエレクトロニクスの専門家の予測も引用して、未来の情報社会の一端について大胆な予測を試みる(相磯1990、郵政省電気通信審議会1997、桑野

1998、郵政省電気通信審議会 1999、通産省機械情報産業局他 1999、Dutta-Roy 1999、Ditlea 2000、Toffler 2000、Pope 2000、IT戦略会議 2000)。

3.2.1 2020年までの情報社会：グローバルネットワークから知的VRシステムの時代

2000年12月から開始されたBS(衛星放送)デジタルテレビは、高精細画像に加えて、インターネットのように情報をやり取りする双方向性を生かしたサービスが大きな特徴である。2000年代の中ころまでに、地上波も含めて全国のテレビ放送が全てこのようにデジタル化する。また、2001年5月に開始される次世代携帯電話では動画の配信サービスも登場する。一方、高速インターネットの登場で、PCでも映画やスポーツ中継など動く映像が見られるようになっていく。今後、通信と放送は融合し、テレビ、PC、携帯電話が融合して新しい情報サービスが現れるだろう。

政府はIT国家戦略として、すべての国民が情報技術(IT)を積極的に活用し、その恩恵を最大限に享受できる知的創発型社会の実現に向け、早急に革命的かつ現実的対応を行い、市場原理に基づき民間が最大限に活力を発揮できる環境を整備し、5年以内に世界最先端のIT国家を目指すとしている⁽¹⁰⁾。

この結果、2010年ころには、全てのメディアがデジタル化され、情報の流れが世界の大部分に瞬時に行き渡るグローバルネットワークの時代を迎える。各家庭は外部ネットワークに接続され、数百テラバイト(10^{12} バイト)のホームサーバが設置されて全ての電気機器がネットワークに接続される。人々は超小型軽量の情報端末(PDA)を身に付けて、音声認識や自動翻訳のインタフェースの助けも借りてネットワークとその端末を自在に使いこなし、「いつでも、どこでも、誰とでも、どんな情報でもアクセス・交換が可能」となる⁽¹¹⁾。また、マルチメディアの特性を活かした多彩な講座が幅広い分野にわたって提供され、オンデマンドにより自らの興味や学習状況に応じて講座を自由に

選択できて、家庭で生涯学習を行う者が増加する。

2020年ころには、集積回路微細化技術は極限まで進展し、技術的に扱えるデジタル情報量はペタバイト(10^{15} バイト)の時代が到来する。電子機器に搭載される集積回路は、人工知能を有するサイバーチップ、つまり「頭脳」まで進化する。頭脳を得た電子機器は、自らネットワークを使って情報をやり取りするようになり、電子VR(仮想現実)秘書や事故を起こさない自動車、更に、各種ロボットといった形で人間の知的労働を支援する。人々は電子VR秘書やアシスタントを常に伴って行動する⁽¹²⁾。このような知的機器やVRシステムの支援によって、より「知的で創造的」な活動に時間を使うことができる。

3.2.2 第三の波

人間社会は農業経済から工業経済へ、そして情報経済へと歴史的転換を果たそうとしている。この転換の原動力は科学技術の発展であるが、その根底には「物質」・「エネルギー」とそれから第3の資源「情報」の概念が重要な役割を果たしている。そのような意味で、情報に深いかかわりをもつ情報通信技術は社会に計り知れない衝撃を与えようとしている。それは時には科学技術の恩恵を享受するという形で社会の進歩に大きく寄与するが、一方では、社会不安や地球規模の難問を少なからず提起することにもなる。

20年前にこの情報社会の到来を予測した有名な未来学者のトフラー夫妻は、最近のIT革命に関する論文の中で、次のような興味深いことを述べている。即ち、これまでの第一の波(農業社会)や第二の波(産業経済)における土地や工場の生産設備(物理的資産)に対して、第三の波の「新しい経済の波」では、「知識」自体(ソフトウェア・サービス資産)が資本の主要形態となって、同じ知識を他人も同時に使用可能となり、資本に関する伝統的解釈の足場を打ち崩すことになる。そして、「乏しい資源の配分の科学」という経済学の定義そのもの

に巨大な風穴を開けてしまう⁽¹³⁾。第三の波への移行は、単なる技術の変革だけでなく、産業構造と経済構造のあらゆる面で地球規模の大変動を引き起こしている。

既に国内で進行している事例として、ITによって経済のルールが変わるために、電子商取引の拡大などにより2004年までの5年間で400万人規模の雇用の増減に影響が及ぶという調査結果が報告されている⁽¹⁴⁾。一方、海外では開発途上国の経済発展が目覚ましい。既に、韓国はメモリ集積回路で世界一に躍進し、台湾はPCの生産やファブリーとよばれる集積回路製造の分野で世界の一翼を担うレベルに達し、また、その他のASEAN諸国、中国もこれに続いている。更に、工業化に乗り遅れたインドでは、農業社会から工業社会をスキップして一挙に情報社会へ進んでいる⁽¹⁵⁾。21世紀は欧米日に次いでアジアの世紀といわれる所以をみることができる。

第3の資源「情報」という概念がもたらす新たな社会では、地理的条件、身体的条件、経済状態による制約が大幅に緩和され、能力と意欲ある多くの国々、地域、人々により公正な機会が与えられる。また、豊かさの変革をもたらして、時間、空間、コミュニティの豊かな社会へとシフトし、時間、空間の制約を受けないビジネススタイル、ライフスタイルは、新たな経験、生活様式、人間関係等を通じて、新たな価値観、発想、文化をもたらし、創造性をもった人間を生み出していくことが期待される。

4. おわりに

20世紀の科学技術をマイクロエレクトロニクスの観点からレビューしてその特徴について解説した。そして、21世紀の科学技術とそれがもたらすであろう文明社会について、マイクロエレクトロニクスの専門家の予測をあげて展望した。トランジスタは20世紀最大の技術革新であるといっても過言でない。トランジスタとその子孫（集積回路など）は社会のあらゆる局面で革命を引き起こしている。それは新たな

産業、新たな可能性、新しい経済パラダイムを創造し、持たざる国を持つ国に変え、戦場の武力闘争の代わりに経済市場で行われるグローバルな競争を可能にした。

しかし、20世紀の科学技術の進展は、それはあまりにも急激であったために、人間・組織・社会などに関する大規模で複雑な問題を提起しているのも事実である。人間の思考や行動・人間の知的活動・組織の振舞い・環境モデル／経済モデルなど、本学部に関する人間科学の領域であり、この種の学際的な新しいソフト系科学の学問分野は知的コンピュータによって大きく進展するものと期待されている（相磯1990）。即ち、ITが提起する諸問題の解決に対して、最先端のテクノロジーであるITが重要な役割を担う。このような意味からも、21世紀の社会を考える上で情報通信技術の専門知識は不可欠である。情報通信技術の研究者として、専門の研究を深めることにより科学技術の発展に寄与することはもとより、その専門の立場から本学部の7つの研究室と協同して研究を推進し、21世紀の新たな人間科学確立へ向けて貢献していきたい。

マイクロエレクトロニクスの進展を中心とする科学技術の発展は時間スケールを含めて20年程度のスパンで予測可能であるが、それがもたらす革命的文明社会はこれまでの経験則で推し量ることは容易ではない。しかし、大筋としては、これまでのモノの豊かさを作ってきたモノ中心の工業社会から、知的で創造力をもった心の豊かな人間をつくる情報社会へと移行すると考えられる。そのような社会であってほしいし、また、そのような社会に導いていくことがわれわれの責務である。

人類は無限の可能性を秘めた科学技術という切り札をもっている。21世紀を迎え、そのすばらしい科学技術がこの新世紀に豊かな繁栄をもたらす、負の遺産とならないように、地球環境、自然、社会に広く目を向けながら、科学技術と社会の調和のとれた発展を考えていきたい。

注記

- (1) IT (または、ICT) とは、Information and Communications Technology、即ち、情報技術 (または、情報通信技術) を指している。つまり、情報を処理する技術と情報を保存する技術 (コンピュータの技術)、更に、情報を伝える技術 (通信技術) などからなる技術を指す。
- (2) このトランジスタの発明により、ショックレイ、バーディーン、ブラッテンに 1956 年ノーベル物理学賞が与えられた。
- (3) 当時、日本のトランジスタラジオは世界各国でブームをよび、生産数量でアメリカを凌駕して、日本の高度成長時代の幕開けとなった。
- (4) Monolithic (一つの石) Integrated Circuit (集積回路)。集積回路の発明によりキルビーに 2000 年ノーベル物理学賞が与えられた。
- (5) 事実、それ以来、図 5 に示すように現在までの集積回路技術はこの法則にほぼ従って進展して、集積回路の能力 (メモリ容量、プロセッサ速度、トランジスタ当たりのコストなど) は 30 年以上にわたり指数関数的に向上してきた。
- (6) 1946 年にペンシルベニア大学で開発された世界初の電子計算機 ENIAC は、135m²の広さの部屋に設置され、重量 30 トン、真空管 18,000 本使用、クロック周波数 100kHz、消費電力 150kW であった。現在の集積回路の技術では、普及タイプのマイクロプロセッサで 340mm²のチップ (重量 1g 以下) に収まり、内臓トランジスタ 36 百万個、660MHz、1.6W のものが可能で (SIA 1999)、いかに飛躍的進歩を遂げているかわかる。
- (7) 設計規則 0.1 ミクロンの MOS トランジスタでは、ゲート酸化膜厚は 1~1.5nm (10⁻⁹m) になると見積もられている。
- (8) MOS デバイスの電気的特性面からの限界を克服するためのデバイスの改良・修正と代替デバイスに関する課題、内部配線による信号遅延等の課題、更に、回路設計能力不足 (ムーアの法則が示すデバイスの製造能力増大 58%/年に対する回路設計能力向上 21%/年のギャップ) にかかわる課題、膨大で複雑な機能をもつモンスター LSI チップの性能試験にかかわる課題等がある。
- (9) 全世界の半導体工業会のエキスパートによる 15 年先を展望した最新の長期予測によれば、2014 年ころに 0.035 ミクロンプロセスが想定され、そのとき、200G ビットの容量の DRAM や 200 億トランジスタを内蔵したクロック周波数 13.5GHz のマイクロプロセッサがそれぞれ 1 チップで構成可能になると予測されている。
- (10) 具体的には、IT 革命の歴史的意義と日本の取り組みへの遅れを強く認識し、国家戦略を構築して、次のような社会を目指す。即ち、全ての国民が情報リテラシーを備え、常に多様で効率的な経済構造に向けた改革が推進され、知識創発型社会の地球規模での発展に向けて積極的な国際貢献を行う社会。重点政策として、超高速 (~100 Mbps) ネットワークインフラの整備、電子商取引の大幅な普及促進、電子政府の実現、人材育成の強化などを 2005 年を目処に実施する。
- (11) その情報端末は、家庭では新聞、雑誌、預金通帳、テレビのリモコンであり、学校では教科書、ノートであり、職場ではパソコン、電話機、FAX などの役割を果たす。
- (12) その秘書は呼べばいつでも目の前に現れ、物理的特性や性格は主人の性格等に応じて随意に設定することができる。もしオフィスの仕事の効率上がるなら、「北欧の大和撫子」を選ぶこともできる。また、学習機能ももち、主人の特性 (くせ) を学習して気の利いた適切な支援をする。
- (13) 更に、真の革命は、滑らかに進行せず、古い定義や手本や尺度を手当たり次第に屑籠に放り込む。従って、産業革命以来のこの IT 革命が、極端な動揺や波乱もなく繁栄の年月を生むという考え方は幼稚なのである。
- (14) 内訳は、249 万人の雇用増 (既存の情報通信産業全体の雇用者数にほぼ匹敵する規模) に対して、163 万人の雇用減となっており、差し引き情報化により 86 万人の雇用拡大効果 (自動車関連産業の全雇用者数にほぼ匹敵する規模) がある。
- (15) 車の運転免許証が 15 分で発行されるという。IT 産業は安い投資で可能であり、外資の後押しもあって起業家が次々と現れ、現在米国に次ぐ IT の輸出国になっている。コンピュータネットワークを使えばインドでも 90% の仕事ができるという。(2000 年 10 月 26 日、NHK BS7、「IT が国を変える」)

参考文献

- 相磯秀夫 (1990) 「コンピュータが情報化社会に及ぼすインパクト」『電子情報通信学会誌』73(1): 6-9
- Bardeen, J. and Brattain, W. H. (1948), The Transistor, A Semiconductor Triode, *Physical Review*, 74(2) : 230-231.
- Ditlea, S. (2000), The PC goes ready-to-wear, *IEEE Spectrum*, 37(10) : 34-39.
- Dutta-Roy, A. (1999), Networks for homes, *IEEE Spectrum*, 36(12) : 26-33.
- Geppart, L., Ed. (1999), Special Report: Semi-

- conductor, The 100-million transistor IC, *IEEE Spectrum*, 36(7) : 22-60.
- Geppert, L. and Sweet, W., Ed. (2000), Technology 2000 Analysis & Forecast, *IEEE Spectrum*, 37(1): 26-116.
- IT戦略会議 (2000)『IT基本戦略』(内閣府)
- Kilby, J. S. (1976), Invention of the Integrated Circuit, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-23 (7) : 648-645.
- 久保脩二 (1989)『トランジスタ／集積回路の技術史』オーム社
- 桑野幸雄編著 (1998)『デジタル革命新時代』オーム社
- Lucent Technology (1997), The Transistor 50th Anniversary, *BELL LABS Technical Journal*, 2(4): 3-168.
- Moore, G. E. (1975), Progress in digital integrated electronics, *Technical Digest of the 1975 International Electron Devices Meeting*, *IEEE*, Washington, D.C. : 11-13.
- Noyce, R. N. (1961), Semiconductor Device-and-Lead Structure, *US Patent 2,981,877*.
- Pope, D. (2000), Wearable Wireless Computers Embedded in Our Future, *Electronics Journal*, November/December 2000: 21-25.
- Shockley, W. (1949), The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistor, *Bell System technical Journal*, 28(4): 435-489.
- SIA (1999), *International Technology Roadmap for Semiconductors 1999 Edition*, Semiconductor Industry Association, San Jose, CA.
- Toffler, A. and H. (2000), Digital revolution enters new phase, *The Daily Yomiuri*, June 5, 2000: 8.
- 通産省機械情報産業局・アンダーセンコンサルティンク (1999)『IT革命がもたらす雇用構造の変化』(通産省)
- 山崎・木本 (1976)『電気の技術史』オーム社
- 矢野他編 (1998)「システム LSI : マルチメディア社会を支える IC 技術 (特集)」『電子情報通信学会誌』81 (11) : 1081-1182
- 郵政省電気通信審議会 (1997)『21世紀ビジョン』(郵政省)
- 郵政省電気通信審議会 (1999)『21世紀における高度情報通信社会のあり方と行政が果たす役割』(郵政省)