

半導体 IP ライセンスで普及した ARM アーキテクチャ

半導体レシピをものづくりにご利用下さい

西嶋 貴史

アーム株式会社代表取締役社長

E-mail: takafumi.nishijima@arm.com

要約:「もの」を売っていない ARM のような半導体 IP のビジネス・モデルの企業形態は、なかなか一般に理解されていない。半導体チップの設計における IP は、料理のレシピのようなものである。ARM は、そのレシピ (IP) をライセンスするだけで、料理 (チップ) は料理人 (半導体メーカー) にお任せするというやり方をビジネス・モデルとして行っている。本報告では、高収益の ARM の IP ビジネス・モデルの歴史的背景および現状に関して説明する。

キーワード: IP、ビジネス・モデル、ライセンス

1. ARM の概要

ARMは1990年11月27日に、英国ケンブリッジに設立された。現在、低コスト、低消費電力、高性能 32 ビットエンベディッド用のRISC μ プロセッサ市場においては、最もポピュラーな企業となっている。2004年12月には米国Artisan社をマージし、マイクロプロセッサの周辺にメモリ・セル、インターフェースなどといった、フィジカルライブラリ分野のライセンス・ビジネスにも参入した。2005年の売上高は、フィジカルライブラリ分野と合計すると、約418百万ドルだった。² 買収前のArtisan社は半導体IP業界で第4位だったが、第1位のARMとのマージにより2位を大きく引き離すこととなった。この意味で、ARMと共同でライセンスをすることによって、より強力な競争力を持ったと考えられる。

2005年末、ARMのマイクロプロセッサIPのライセンスを受けている企業は172社あり、のべ398件の契約があった。一方、フィジカルライブラリのライセンスにおいては、のべ

¹ 本稿は2006年2月16日開催のコンピュータ産業研究会での報告を許経明(東京大学大学院)が記録し、本稿掲載のために報告者の加筆訂正を経て、GBRC編集部が整理したものである。文責はGBRCに、著作権は報告者にある。

210 件の契約があった。ライセンサー¹ 社が ARM と結ぶ契約件数は、1、2 件の場合もあれば、10 件以上に及ぶ場合もある。

2004 年に、ARM のマイクロプロセッサを使った SOC (System on Chip) の出荷数は約 12 億個だったが、2005 年には、16.7 億個まで増加した。特に、2005 年の第 4 四半期は 4.99 億個に達し、毎日 550 万個に達した。この成長の勢いでは、2006 年には年間 20 億個の出荷数になると考えられる。

ARM のマイクロプロセッサを搭載する最終製品は、携帯電話、デジタルカメラ、DVD レコーダー、シリコンオーディオプレイヤーなどである。また、1 台の機器の中に複数の ARM のマイクロプロセッサが搭載されている場合もある。

2. ARM 社の歴史

ARM の前身は、1979 年にケンブリッジ大学の教授たちが設立した Acorn 社である。当時、Acorn は教育用のパソコンを開発し、CPU は外部から調達していた。しかし 1985 年、Acorn はパソコンに適合した CPU を外部から調達することができず、やむをえず最初の RISC CPU を自社開発した。

インテルが RISC ではなく、32 ビットの CISC CPU (i386) を開発したのはちょうどその頃であるが、当時、「CISC 対 RISC」の論争があった。CISC とは Complex Instruction Set Computer (複雑命令セットを持ったコンピュータ)、RISC は Reduced Instruction Set Computer (縮小型命令セットを持ったコンピュータ) である。CISC は 300 種類の命令セットを持っているのに対して、RISC のそれは 100 種類である。しかし、RISC は命令セットやトランジスタが少ないとはいえ、多様なプログラムのシンプルな命令セットを組み上げることによって、クロック・スピードを上げることが可能になり、RISC のパフォーマンスは CISC に劣らない水準に達すると考えられた結果、RISC という新しい CPU の概念が生まれた。

最初 RISC のコンセプトは、1964 年にリリースされた IBM 360 メインフレームに対する議論に由来したものである。当時、IBM 360 メインフレームのアーキテクチャは、全世界を制覇したぐらい有力であった。日本でも通産省が関係して、日系メーカーが連合軍を組んで IBM 360 メインフレームと互換性がある機種を開発して、ビジネスとしては大成功だった。その後、IBM 360 の命令セットを分析した人たちがいて、1980 年代初期、IBM の 801 コンピュータに関する論文を発表した。これが、コンパイラ・エンジニア、ソフトウェア・エンジニアによって発明された新しいコンピュータのアーキテクチャであった。つまり、ハードウェア・エンジニアは一所懸命に命令セット、トランジスタを増やして性能を上げようとし

² そのうちマイクロプロセッサの売上は 300 億円以下だった。

たものの、10万個ぐらいのトランジスタのうち3万個しか動いていなかったのに対して、コンパイラ・エンジニアは難しい命令セットを簡単な命令セットに変えて仕上げることで、3万個ぐらいのトランジスタだけで成功裡にCPUの性能をあげることができた。CISCの1 MIPSに対して、RISCは10 MIPSという高性能だったのである。RISCの代表作としては、MIPS、SPARC、Power PCなどがあげられる。MIPSはスタンフォード大学の教授に、SPARCはUC Berkeleyの教授によって開発されたアーキテクチャである。MIPSについては、その後、会社が設立された。そして、Work Stationの会社の大半が、MIPSを使ってサーバーを開発した。例えば日本では東芝とNECがMIPSのライセンスを受けてサーバーを開発していた。一方でSPARCについてはSun Microsystems、日本では富士通がそのライセンスを受けて、サーバーを開発している。Power PCは、IBMがIBM 801を改造した新しいアーキテクチャであり、サーバーに使われていた。また、その後、Power PCはMotorola半導体会社³にも使われるようになった。

MIPS、SPARC、Power PCにおける各社の競争の焦点は、いかにCPUの性能を上げるかにあった。その中でAcorn社は1987年に、より低消費電力のRISCを開発した。これは、英国のケンブリッジ対アメリカ・カリフォルニアのシリコン・バレー（Sun、MIPSなど）という性能競争において、ケンブリッジはとても太刀打ちできないのではないかという認識があったため、低消費電力のRISCの道を選んだのだった。もうひとつの理由としては、Acornの教育用のパソコンには高性能のCPUが向かなかったため、高性能CPUの開発にはあまり懸命ではなく、それよりはむしろ低消費電力のCPUを目指そうとしていたことがあった。上記の二つの理由から、Acornは低消費電力のCPU開発の道に踏み出すことを決意したのである。上記の制約条件と選択は、Acornにとって、むしろ後々の大成功のきっかけとなった。⁴

1993年に発表されたニュートンは、市販された最初のPDAのひとつである。⁵アップルのニュートンPDAはAT&TのHobbitのマイクロプロセッサを使っていた。しかし、HobbitはRISCではなく、電力消費面でも芳しくなかったため、アップルは別のRISCを探し始めた。ちょ

³ 2004年6月からMotorolaから独立し、社名はFreescale Semiconductorに変更された。

⁴ ただし、当時は携帯電話を意識して低消費電力を目指したわけではなかった。

⁵ 初期のモデルは、かさばり、高価なうえ、バグだらけだった。アップル社のマーケティングもお粗末で、ニュートンはあちこちで馬鹿にされた。ギャリー・トゥルードーによる漫画『ドゥーンズベリー』の忘れがたい一編は、ニュートンの悲運を事実上決定したといってもいいだろう。

その後のモデルは大きく改善されたが、ヒットにはつながらなかった。パーム社が参入し、ニュートンよりも小型で安価で使いやすい『パーム』が人気を集め、急速にハンドヘルド機市場を支配するようになった。市場調査を手がける米ガートナー社データクエスト部門によると、1997年の市場シェアはパームが66%、『ウィンドウズ CE』搭載機が20%で、ニュートンはたった6%だった。人気の絶頂期でも、推定20万人しかニュートンを使っていなかった。

<http://hotwired.goo.ne.jp/news/technology/story/20020830301.html>

うどAcornには1987年に開発した最初の低消費電力のRISCがあって、それはVLSI社に作ってもらったものだった。その後、VLSIは低消費電力のARM RISCチップをニュートンPDAに搭載するように、精力的にアップルに売り込んだ。しかしアップルは、Acornがアップルのマックのようなパソコンを作って売り始めるのではないかと恐れたため、Acornのマイクロプロセッサ部門を別会社にする方が良いと提案した。その結果、アップル、VLSIとAcornの共同出資で1990年にARM社が設立された。

その際に彼らは、別の大きな決断にも迫られた。それは、一体ARMをどのようなビジネスにするべきか、ということだった。つまり、VLSIの中で、CPUを開発する一部門とするべきか、Appleの中で、CPUを開発する一部門とするべきか、設計に専念し、製造はVLSIのような半導体メーカーに任せ、半導体メーカーが作ったチップを他社に売るべきか、という選択肢があったのである。結局、ARMはのIPのライセンス・ビジネス・モデルという選択肢をとった。これも、後々のビジネス展開を非常に有利なものにするひとつの選択だったと考えられる。

設立翌年の1991年には、ARM6が発表された。これは1992年にシャープとライセンスをし、PDAに搭載されるようになった。1993年には、TIとARM7のライセンスをし始めた。TIの携帯用のDSPは非常にポピュラーになったので、これも非常に運が良かった。同じ年に、インテルはPentiumを発表したが、これも高性能を追求しているプロセッサであって、低消費電力にはあまり目が向いていなかった。1994年には旭化成マイクロ、Samsungとライセンスをし始め、また、日米に事務所を設立した。1995年にはDEC、LG、NECとライセンスをし始めた。当時、DECの半導体部門は非常に高性能かつ世界で最もハイスピードの α RISCのCPUを開発し、Strong ARMと名づけて発表した。DECの半導体部門は後ほどインテルに買収されたが、現在、インテルはStrong ARMのアーキテクチャをベースにし、ネットワーク・サーバー向けのXscale CPUを開発している。1996年には沖電気、ローム、ヤマハがライセンスをし、Windows CE on ARMを開発し始めた。1997年になると、Lucent Technologies、Philips、Sonyがライセンスをし始めた。また、1997年には、NTT DoCoMoがiモードにARMに載せたSun MicrosystemsのJava OSを採用し始めた。当時はPDAがなくなり、その機能は携帯電話に付けられるようになるのではないかとという予測状況はあったものの、携帯電話にJava OSを載せることはやはり不可能であると考えられていた。また、Java OSはPDAに載せてもあまり性能が発揮できない時代だった。しかし、ARMはDoCoMoと緊密になって、ARMに載せたJava OSの携帯電話への導入を成功裡に行った。このような機能を通じて様々な面白さを体験できることが、DoCoMoの非常に魅力的な点になった。日本の携帯電話の多機能性を実現できたひとつのきっかけは、ARMが使われるようになった

ことにあるといえるのではないか。

ARMはIPだけを開発しているが、実際にシリコン上でチップを作るには、様々なサードパーティとの協業が欠かせない。例えば、現在半導体はCMOS(Si)が主流となり、半導体工場ごとにデザイン・ルールが違うため、論理設計から物理設計にするためにはIP Coreのcharacterizationが必要である。その作業は1997年から、Synopsysと共同でやっている。これは多くの半導体メーカーに広めてライセンスをしていくうえで、非常に重要なことである。

ARM社は、1997年にPalmChipの株式の45%を取得した。PalmChipのチップのソフトウェアとハードウェアは部門として分かれていたが、ソフトウェアはのちほど別会社にした。PalmChipを獲得したのは、当時のPDAはARMにとっては非常に重要なマーケットだったからである。

その後、1998年にHP、IBM、松下、セイコーエプソン、Qualcomm、Intelとライセンスをし、Cadenceとdesign partner、Symbian⁶ partner、ARM10 Thumbを発表した。その年には出荷累計5000万個に達したが、ここから驚くほど急速に成長してきた。1999年にはLSI、ST、富士通、東芝と、2000年には三菱、三洋、Motorolaとライセンスした。

当時、ARMはJavaをLinuxに載せてみると、とにかく動いたといった程度の話で、とても使えるような状態ではなかった。Javaの性能の向上がとても重要であり、accelerationの研究を続けた結果、2000年になってARMはJazelleを発表した。今では最先端の電話にはJazelleが載っているはずである。Jazelleを載せた携帯電話でゲームをやるのと、載せていない携帯電話でゲームをやるのとは、相当違うらしい。

2000年にIntelがXScaleを発表した。同じ年に、TSMCとUMCとファウンドリ・プログラムを結んだ。2001年には川崎マイクロとライセンスし、IntelがARMアーキテクチャライセンスを取得した。2002年には、Seagate、Broadcomがライセンスした。この年には、ARMのマイクロプロセッサを搭載するチップは出荷累計10億個に達した。また、ARM11のリリースを発表した。2003年にソフトウェア、ICテスト、デバッグ、開発ボードというサードパーティとコネクテッド・コミュニティを設立した。2004年に、Artisanを買収し、Cortex-M3、MPCoreを発表した。2005年には、ルネサスがライセンスした。また、Cortex-A8を発表した。この年には、ARMのマイクロプロセッサを搭載するチップの出荷が年間16億個に達した。

⁶ アメリカの有力PDAメーカーがパーム社であったのに対して、イギリスにはPsion社があった。Psion社はソフトウェアとハードウェアの両方ともやっていたPDAの会社だった。ところが、PDAのビジネスはうまくいかず、ソフトウェアとハードウェアを分離し、別々の会社にした。OSの部分はSymbianという会社として独立させた。その後、NokiaはSymbianに出資することによって、SymbianのOSが携帯電話に使われるようになった。これはまた、ARMにとってひとつの幸運だったのではないかと考えられる。それは、SymbianはARM用のOSしか開発していなかったからである。

3. 半導体ビジネスでの ARM の評価

ARM は、*Electronic Business* 誌に、過去 30 年間でもっとも影響のあった 10 社の中の 1 社として選ばれた。この雑誌の評価基準は必ずしも会社のビジネス的な成功だけではなく、エレクトロニクス業界へどれほどのインパクトがあったかという点も考慮する。ARM 社が選ばれた理由は、「もはや、自社内 CPU 設計の時代は終わった」ということだった。昔は、コンピュータメーカーが独自に OS、CPU を作らなければいけなかった。しかしながら、現在はもはやそんな時代ではない。つまり、コンピュータメーカーの仕事といえば、Windows の OS とインテルの CPU を買ってきて、製品開発を行うということが定番となっている。マイクロプロセッサもコンピュータ業界と同じように、昔はマイクロプロセッサの商売をする会社は、マイクロプロセッサの上に OS を開発しなければならなかった。現在は、マイクロプロセッサの会社は IP を買ってきて、その上で OS を買ってきてインテグレーションをする、という仕事になっている。このようなマイクロプロセッサのビジネスを変えてしまったのが、ARM なのである。

下記は、*Electronic Business* 誌で、ARM 以外に受賞をした 9 社である。

Applied Materials : 「ムーアの法則を達成せしめた製造装置」

IBM : 「オープンアーキテクチャで PC に参入」

Intel : 「今日のコンピュータに影響を与えた運命のチップ 8080」

LSI Logic : 「ASIC 市場を創り出した」

Molex : 「コネクタ」

Sony : 「新製品、Walkman、Transistor TV、Video Recorder、PlayStation」

Texas Instruments : 「DSP、Speak & Spell」

TSMC : 「半導体製造サービスというモデル」

Xilinx : 「ファブレス半導体企業というモデル」

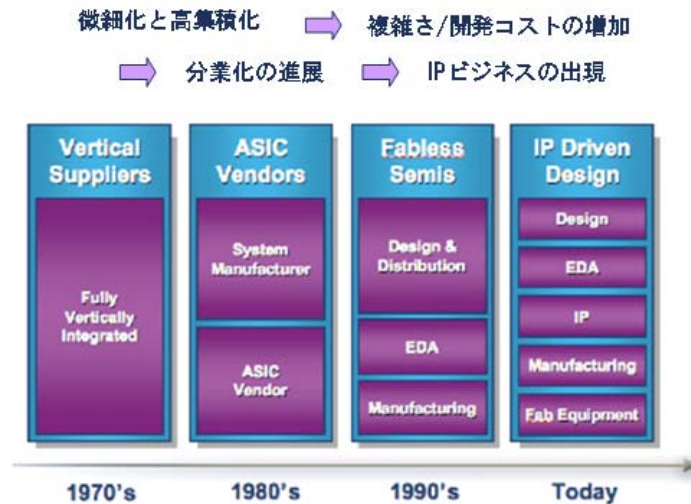
4. ARM の IP ビジネス・モデル

図 1 のように、1970 年代は、チップは半導体 1 社で設計から製造までという垂直統合の時代だった。また、半導体メーカーもチップのスペックを決めて、できあがったチップは主に半導体メーカーが販売していた。1980 年代になると、車用、携帯用、テレビ用、ビデオカメラ用などといった顧客向けの特殊な ASIC のビジネス形態が現れてきた。顧客（キャノン、エプソンのような System Manufacturer）は仕様を決めて、半導体メーカー（ASIC Vendor）はそれを作る。これが、現在日本で主流なビジネス・モデルとなっている。

1990 年代には、ファブレスとファウンドリというビジネス形態が出てきた。また、Cadence、Synopsys などの EDA 専門メーカーが出現してきた。2000 年代には、ロジック設計は全部自分でやるわけではなく、CPU、インターフェース、メモリなどを外部から買ってくるという

図1 半導体 IP ビジネス出現の背景

半導体IPビジネス出現の背景



新しいチップの設計方法にかわった。

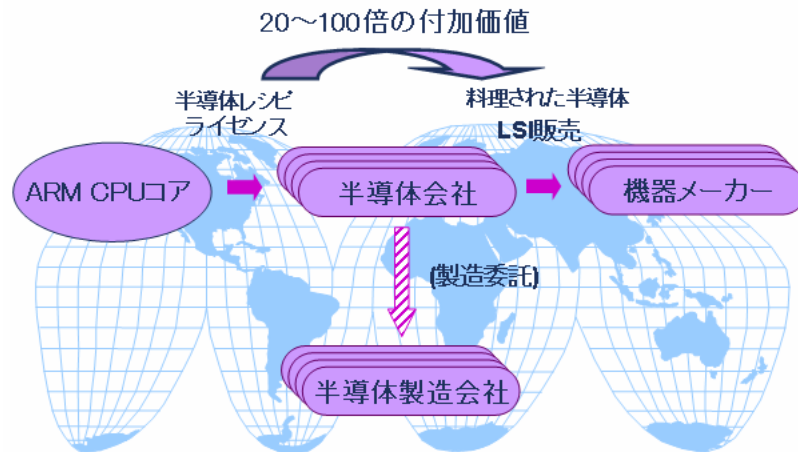
このような産業構造の変化の背景には、プロセス技術の微細化があったと考えられる。例えば、1970年代にはチップを1万トランジスタで作っていたのが、現在では最先端で2億トランジスタで作るようになってきている。このような2万倍の複雑さをこなすのは、大変な作業となる。それは非常に複雑な仕事なので、自社ではとても処理できず、分業せざるを得ない状況になった。昔は一部屋を占めたコンピュータが現在は爪のサイズになった。つまり、コンピュータの世界のオープン化という現象の分業化は半導体産業にも起きている。その結果、付加価値は上位レイヤに移り、プラットフォームはコモディティになり、IPというビジネス・モデルも現れてきた。

次はARMのIPビジネス・モデルを説明する。

まず、図2のように、ARMがマイクロプロセッサをIPとして半導体会社にライセンスする方法がある。半導体会社は自分でチップを製造する場合もあれば、外部の半導体製造会社に製造を委託する場合もある。できあがったチップは半導体会社により、携帯電話メーカー、デジタルカメラなどの機器メーカーに供給される。大事なことは、半導体会社がARMのCPU IPに基づき、LSIを開発し機器メーカーに売るときは、20~100倍ぐらいの付加価値が生まれることである。ARMのCPU IPの売上は300億円以下なのに比べて、ARMのCPU IPを搭

図2 ARMのIPビジネス・モデルの概要

ARM CPUコアIPのライセンスビジネス概要



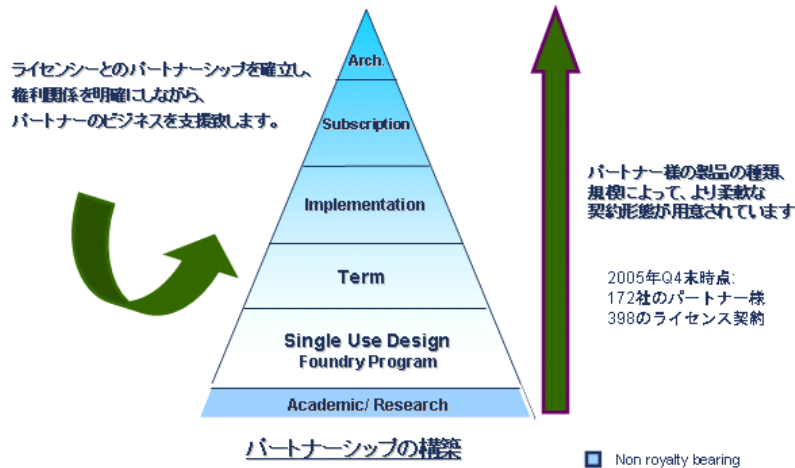
載するチップの売上は何兆円単位になる。その差は付加価値の差である。一般的に、5000万トランジスタのチップ中にARMのマイクロプロセッサの部分としては100万のトランジスタが入っている。残りの4900万のトランジスタにはメモリ、ネットワークなどの機能が入っていて、結果としては高く売られている。

ARMのライセンスのパターンは図3のように何種類かのパターンがある。まず、アカデミック・研究目的のライセンスは、ロイヤリティをつけない。シングル・ユーズ・デザインでは、1種類のLSIを開発することができる。また、ターム・ライセンスでは、一定の期間内でARMのマイクロプロセッサを使用してもかまわない。インプリメンテーション・ライセンスでは、期間、制限もなく、何個のチップを作っても結構である。ARMによって次々に開発されたCPUを使用できるサブスクリプション・ライセンスもある。最後のアーキテクチャ・ライセンスでは、ARMからライセンスしたものを改造改善して、より良いものにすることができる(例えば、命令セットを加えることもできる。ただし、他との互換も守らなければならない)。例えば、インテルのXscaleチップはARMの互換チップであり、別の命令セットを入れているというアーキテクチャ・ライセンスのパターンである。アーキテクチャ・ライセンスのライセンス・フィーが最も高い。

2005年第4四半期末の時点で、172社がARMと契約して、のべ398のライセンス契約を結んでいる。ただし、ライセンシーはARMのライセンスを受け、チップを開発して、市場

図3 ライセンスのパターン

柔軟なライセンス選択肢



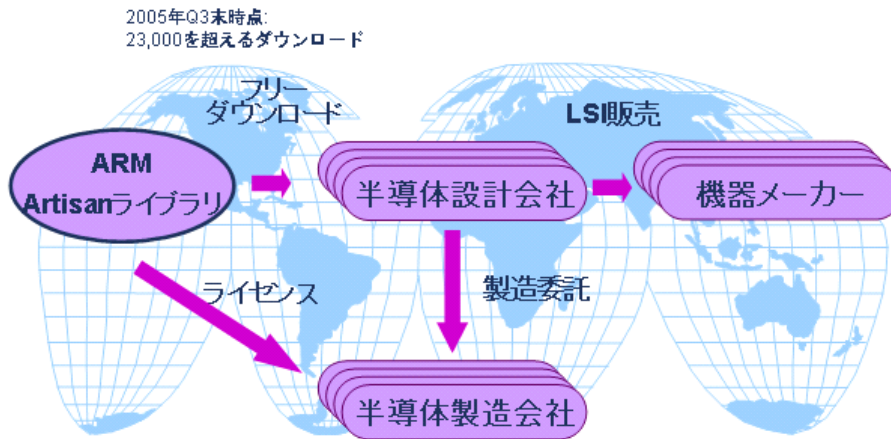
に送り出す時間が長くなるため、上記のライセンス契約数の半分しか市場にチップを送り出していないというのが現状であり、数十社はまだチップを出荷していないかもしれない。半分以上の会社は今からチップを出荷するという。この意味で、これから新しいチップを開発する会社が増え、ますます出荷するチップの数は多くなる。2010年には45億の出荷個数に達するのではないかと。

もうひとつのビジネス・モデルには、図4のようなARM ArtisanのライブラリIPのライセンス・ビジネスがある。このライセンス・ビジネスは基本的にCPUのライセンス形態と類似しているが、半導体設計会社はARMのウェブサイトからArtisanのフィジカル・ライブラリをフリーダウンロード(契約費用はらない)し、ファウンドリといった半導体製造会社に製造を委託する。つまり、ARMはファウンドリにフィジカル・ライブラリをライセンスすることで、半導体設計会社はファウンドリに頼むと、マスクはすぐできる。そのため、半導体設計会社はマイクロプロセッサの周りを設計するだけで済むわけである。⁷ また、最近ではARM7もフリーダウンロードになり、TSMCに生産を依頼すれば、周りの回路だけを設計することになる。最後に、半導体設計会社のチップはTSMCで生産され、出荷されたら、TSMCはARMに費用を払う。つまり、半導体設計会社は最後までARMに費用を払わない。このようなビジネス・モデルによって、2005年第3四半期末の時点で設計プロジェクト数は世界

⁷ 例えば、高速インターフェースのセル・ライブラリを使って、周りの回路を作ることができる。

図4 Aritsan のフィジカル・ライブラリ IP のライセンス・ビジネス

ARM ArtisanライブラリIPのライセンスビジネス概要



で 23000 件に達した。⁸

ARM のビジネス・モデルには、サードパーティの協力がとても重要である。現在、ARM のコネクテッド・コミュニティには、320 社の参加メンバーがいる。そのうち、ライセンシーは 172 社で、残りはサードパーティである。ARM はチップ設計者に、ネットワーク・スタック、グラフィックス、EDA というサポートがあるかどうかを頻繁に問われる。補完的な開発環境の全てを自社開発で揃えるのは非常に難しい。そこで、サードパーティの協力が必要となる。ひとつの CPU の開発費は 100 億円ぐらいかかるが、CPU を維持し、サードパーティを集めることはさらに大変である。

5. 低消費電力および技術ロードマップ

ARM 社は図 5 のように、ARM7、ARM9、ARM11、Cortex という形で製品を出している。インテルと匹敵するほどの 2000 DMIPS 以上を超える性能を出している。

また、図 6 のように、2005 年第 3 四半期の出荷数は 4 億 9900 万個に達した。Quarterly で若干の出荷数の波があるが、この勢いで 2006 年には 20 億個の出荷数に達すると考えられる。

⁸ もちろん、すべてが製造を成功させるわけではない。しかし、とにかく、設計プロジェクトは開始されているということである。

消費電力においては、図7のように、Cortex-A8は2000DMIPSでありながら、1ワットに達していない数百ミリワットの消費電力パフォーマンスがある。競合他社の高性能プロセッサの場合は、3ワット以上かかるという。また、ARM7、ARM9シリーズにおいては、500DMIPSを達していないようなプロセッサが多いが、約200ミリワットぐらいの消費電力で動く。

図5 ARMマイクロプロセッサのロードマップ
ARM CPU ロードマップ

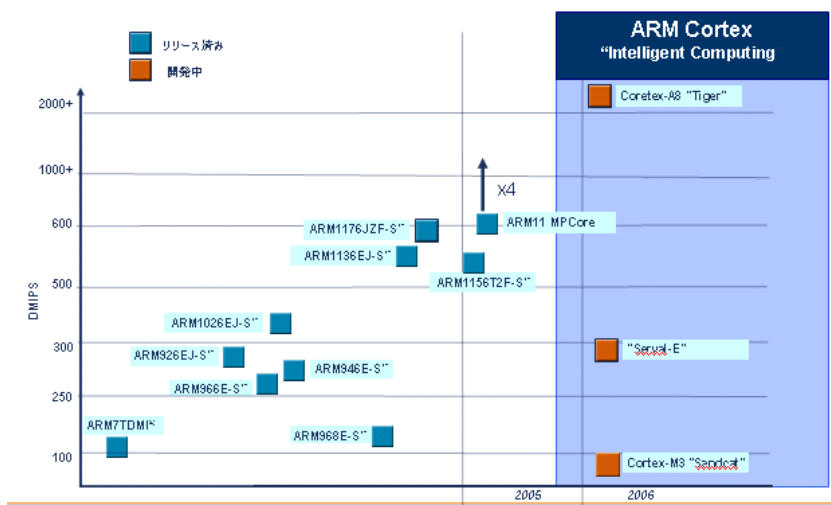


図6 四半期毎のARMを搭載されるチップの出荷数

四半期毎のARMコア出荷数

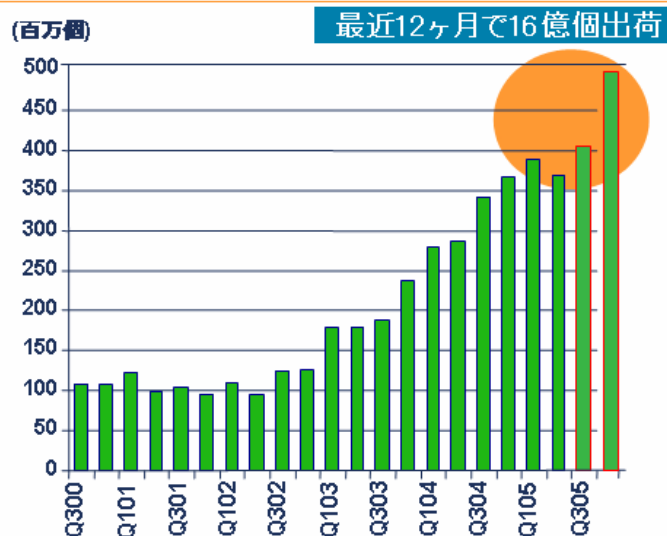
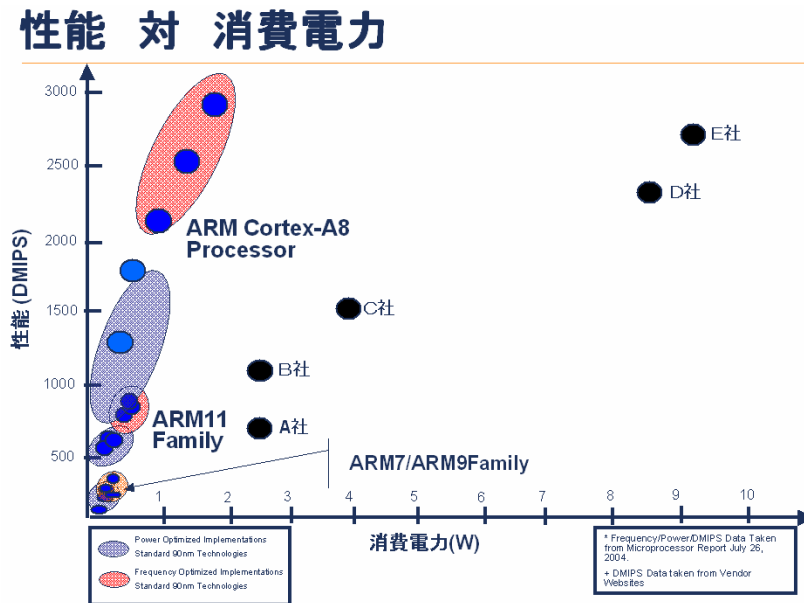


図7 性能対消費電力



ARM11 というのは、約 1000DMIPS ぐらいの性能があると同時に、それでも 500 ミリワット ぐらいの消費電力しかない。今度 Cortex シリーズをリリースしたが、それは 2000DMIPS ぐらいの性能に届いているが、それでも 700 ミリワット ぐらいの消費電力しかない。

低消費電力の効果の代表例としては、ARM7TDMI は 8mW/124DMIPS、ARM926EJ-S は 120mW/282DMIPS、ARM1136J-S は 240mW/360DMIPS ぐらいの高性能でありながら、低消費電力である。ARM の利用により消費電力が 1W 節約できているとすると、1 年間で節約する電力は、累計 50 億個 × 1W × 8H × 365 日 = 500 万 KW × 3000H = 150 億 KWH ということになる。仮に、電力消費量は 7100KWH/人・年（日本の場合）とすると、200 万人の年間電力使用量節約に匹敵する。繰り返し言うが、2006 年には 20 億の出荷個数に達する見込みがある。また今後携帯電話以外の商品分野にも拡大し、2010 年になると、45 億の出荷個数に達する見込みがある。そのひとつの大きな商品分野は自動車である。すでに STMicro、Philips、TI に採用され、欧米の自動車メーカーに納入された事例がある。

最後に改めてまとめると、ARM の普及における三つの転機背景としては、 早期に低消費電力にフォーカスしたこと、 IP ライセンスの道を選んだこと、 携帯電話の波に乗れたことがあげられると考えられる。

赤門マネジメント・レビュー編集委員会

編集長 新宅 純二郎

編集委員 阿部 誠 粕谷 誠 片平 秀貴 高橋 伸夫 藤本 隆宏

編集担当 西田 麻希

赤門マネジメント・レビュー 5巻5号 2006年5月25日発行

編集 東京大学大学院経済学研究科 ABAS/AMR 編集委員会

発行 特定非営利活動法人グローバルビジネスリサーチセンター

理事長 高橋 伸夫

東京都文京区本郷

<http://www.gbrc.jp>