

題名	シリコンバレーでの我が半生—新製品開発にかけて
Title	My Life in Silicon Valley: Bringing New Products into the World
著者名	フェデリコ・ファジン
Author(s)	Federico Faggin
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	The Inamori Foundation: Kyoto Prizes & Inamori Grants
受賞回	13
受賞年度	1997
出版者	財団法人 稲盛財団
Publisher	The Inamori Foundation
発行日 Issue Date	8/30/1999
開始ページ Start page	124
終了ページ End page	156
ISBN	978-4-900663-13-1

シリコンバレーでの我が半生—新製品開発にかけて

フェデリコ・ファジン

子どもの頃

私が思い出す限り、私は機械の虜でした。私はイタリアで育ちましたが、5歳の頃、私が住んでいた町の道路工事に巨大な蒸気ローラーが使われているのを初めて目にしました。本当に蒸気で動いている巨大な機械を見て私は興奮し、ローラーの運転手さんについていきたくまりました。私は車や、バイク、蒸気機関車などを見ると好奇心の固まりになりましたが、特に飛行機を見るといつも興奮したものです。私は大人になったらパイロットになりたいと思いました。11歳の時、初めてゴムバネを使った模型飛行機を飛ばしている人を見ました。この時まで、自分で飛行機の模型を組み立て、実際に飛ばすことが出来るとは夢にも思っていなかったもので、私は非常に驚きました。同時に、自分でも模型を作ってみようと思ったからです。「大人になるのを待たなくても、今すぐ空を飛べるのだ」と、この時私は思ったのです。もちろん、私自身が大空を飛べるわけではありませんが、自分で作った模型が空を飛ぶのを見るのは、どんなにわくわくすることでしょう。

私は自分の目で見た模型飛行機の記憶だけをたよりに、家にあったものを使って模型飛行機を組み立ててみました。航空力学については何も知らずに作ったのですから、この飛行機が飛ぶわけがありません。でも、幸運なことに、以前模型飛行機を飛ばしていた人を見た場所に自作の飛行機を持って行くと、その人が自転車に乗ってやってきました。今考えると、この人はおそらく20代の青年だったでしょうが、子どもの私にはとても年をとっていたように思えました。私の持っていた飛行機に気付くと、この人は立ち止まり、じっと見つめました。私がどうやって作ったかを説明すると、この人は笑い出しました。こんなに変わった飛行機を見たのは初めてだったのだと思います。それでも私に同情して、どこで材料を買えば良いかなど、色々なことを教えてくれました。私はすぐに模型飛行機の作り方の本を買いました。自分の小遣いで本を買ったのはこの時が初めてでした。私は夢中になってこの本を読みました。こうして出来上がった2作目は30メートルまっすぐに飛んだ後、墜落しましたが、それでも私はこれを処女飛行と呼びました。3番目の飛行機は、うまく飛ばすことが出来、私は空を征服したと思いました。12歳の時でした。

私はハイスクールを卒業するまで、色々なことに情熱を傾けましたが、何かに熱中した経験は、この模型飛行機作りが最初だったと思います。しかし、このように趣味に熱中することが将来役に立つとは、大人になるまで全く気が付きませんでした。今、考えると模型飛行機作りの中には創造的な仕事の要素が全てあるのです。まず、どのような飛行機にしようかというアイデアが生まれ、その特徴を頭の中で描き、次に

MY LIFE IN SILICON VALLEY: BRINGING NEW PRODUCTS INTO THE WORLD

Federico Faggin

Growing Up

Ever since I can remember I have been fascinated by machines. When I was five years old and growing up in Italy, I remember the day a huge steamroller—actually running on steam—came to town. I was so excited that I wanted to leave with the man driving the machine. The sight of a car, motorcycle, steam locomotive or airplane, and especially airplanes, would never fail to arouse my curiosity. I wanted to be a pilot. When I was eleven I saw for the first time a rubber-powered model plane fly. I was stunned, I couldn't believe that one could build flying toys. I determined that I was going to build myself a model plane. Now I could fly, even if vicariously, without having to wait to grow up.

I started building my first model plane based only on my observation of that flying model, using generic material found around the house. Of course that plane couldn't possibly fly as it violated all aerodynamic laws known to man. I was lucky, though, because while I was trying to make my plane fly in the same field where I saw the original model, its owner happened to come by in his bike. He was probably a young man in his twenties, but he looked like an old man to me. Curious, he stopped to take a good look at my plane. When I showed him what I had done he started laughing. I'm sure he had never seen such an unusual plane before. However, he sympathized with me and taught me what I should do, where to buy the proper materials and so on. I bought a book on how to build model planes, the first book I purchased with my own money, and I studied it avidly. My next plane made a straight flight of thirty meters before crashing—I mercifully called that my maiden flight. My third plane, however, flew very well. I had conquered the air. I was twelve.

That was the beginning of a passion that was an important part of my growing years until I graduated from high school. I didn't realize until later how formative that hobby was. I learned the complete cycle of creation, starting with an original idea of a plane, visualizing its critical features, making a construction plan, procuring the materials, building it, testing it and enjoying the result. In a sense, designing and building model planes was more than a hobby for me; it was all that interested me, back then, and all my spare time was dedicated to it. When I was twelve, I severely injured my left eye. Now I could no longer become a pilot; undaunted, I decided that I would design and build real planes instead.

I decided to go to a technical high school, the Institute Rossi in Vicenza. I wanted a degree in aeronautical engineering. Unfortunately, the curriculum in aeronautical engineering was phased out one year after I started at the Institute, and I had to choose a different specialty. Radio engineering, for which I had genuine interest, was my next best choice. I must confess, though, that my desire to learn how to build a radio

作成計画を立て、材料を買い集め、組み立て、テストして、結果を楽しむという、創造のプロセスは模型作りにも、後年私が携わったプロジェクトにも共通しています。私にとって模型飛行機を設計し、組み立てることは趣味以上のものでした。当時私の頭の中は飛行機のことではいっぱいでしたから、時間があればいつでも決まって模型を作りました。12歳の時、左目に大けがをしパイロットになる夢を諦めなければならませんでした。代わりに、私は本物の飛行機の設計者になる決心をしました。

そこで、テクニカル・ハイスクールに行こうと思い、生まれ故郷のビチェンツァにあるインスティット・ロッシに入学しました。ここで航空工学を学ぶつもりだったのですが、残念なことに私が入学して1年後に航空工学のコースがなくなってしまいました。それで、次善の策として無線技術の勉強をすることにしました。実を言うと、無線操縦の模型飛行機を作りたいという気持ちもあったのです。

私は学校の成績が良く、5年後に卒業した時は、学校で1番でした。ハイスクール時代に、私はコンピュータと物理にも関心を持ち、多くの本を読みました。

仕事に就いた頃

オリベッティ社に入社したのは、まだ19歳になる前でした。私はミラノ近郊のボルゴロムバルドの電子研究所でアシスタント・エンジニアとして働きました。1960年当時、電子計算機を設計・製造していたのは、イタリアではオリベッティ社のみでした。ここでの仕事が、私にとって最初の仕事となりました。私は新しいことを学び、収入を得て、独り立ち出来ることをとてもうれしく思いました。2ヶ月訓練を受けた後、私は小さな電子計算機の設計・製造をする小グループに入りました。演算ユニットはすでに設計が終わり、一部製造が始まった段階にありましたが、残り（命令セット、命令制御装置、磁気コア・メモリ、入出力サブシステム）は全てこれからでした。

6ヶ月経たないうちに、私はプロジェクト・リーダーに指名され、4人のアシスタントを持つことになりました。その時私はまだ19歳で、アシスタントの方が全て年上でしたから、何とも言えない満足感を覚えたものでした。私は小型コンピュータの設計を終え、1961年の末には稼働させることが出来ました。このコンピュータには、ダイオードとゲルマニウム・トランジスタで出来たエクスクルーシブNORゲートを使用しました。当時、スピードの速いシリコン・トランジスタはまだ値段が高く、また、集積回路もまだ市販されていなかったのです。4,000ワードの磁気コア・メモリを使用したこのコンピュータは、キャビネット位の大きさで高さが1.8メートル、幅が0.5メートルあり、約100個のプリント基板を搭載していました。

controlled model plane added considerable weight to my choice.

I did very well at school, graduating five years later the best in the Institute by a wide margin. During the high-school years I became also interested in computers and in physics and I enjoyed reading many books on those subjects.

My Early Work Experiences

I had not yet turned nineteen when I was hired by Olivetti to work as an assistant engineer at their Electronic Laboratories in Borgolombardo, near Milan. In 1960, Olivetti was the only company in Italy designing and building electronic computers. This was my first job. I was very excited to learn new things, earn some money and be independent. After a training class of a couple of months, I was assigned to a small group that was designing and building a small electronic computer. The arithmetic unit had already been designed and partly built, but the rest of it—the instruction set, the instruction control, the magnetic core memory and the input-output subsystem—still remained to be done.

Within six months I became the leader of the project and I was assigned four assistants to help me with the construction of the computer. I was very proud because all the people working for me were older than me—I was nineteen. I completed the design of that small computer and I had it running by the end of 1961. That computer used almost exclusively NOR gates made with diodes and germanium transistors. Faster silicon transistors were still too expensive, and integrated circuits were not commercially available yet. With 4,000 words of magnetic core memory, this computer was the size of a cabinet, 1.80 meter tall by 0.5 meter wide, and included about one hundred printed circuit boards (PCB).

Little did I know then that only nine years later, married and in a foreign country, I would be in charge of developing the world's first microprocessor. With it, a computer of roughly the same capability—in fact, twice as fast as my earlier machine—could be built, using only a single PCB, an improvement of more than a factor of one hundred!

During the summer of 1961, the idea of going back to school started to appeal to me. I became interested in Solid State Physics—I wanted to really understand how transistors worked—and I wanted a stronger theoretical knowledge in mathematics and physics. I left Olivetti at the end of 1961 and became a physics student at the University of Padua, close to my hometown of Vicenza.

I enjoyed my university years immensely; I liked to learn new things and because of it I was an outstanding student. In many subjects, electronics in particular, I did much more work than what was strictly required to pass the exam. I have fond memories of afternoons spent in the library studying; and of the joy I felt when I could understand a

それから9年後に、遠い外国で妻をともない、世界初のマイクロプロセッサの開発に従事することになるとは、当時は夢にも思いませんでした。このマイクロプロセッサは、私が作ったコンピュータとほぼ同じ能力（実際は2倍の速度）を持ちながら、たった1個のプリント基板しか搭載していません。言い換えればプリント基板の性能が100倍以上上がったことになります。

1961年の夏に、私は再び学校で勉強したいと思うようになりました。私はトランジスタの働きを十分理解したいと思い、固体物理学を学ぼうと思いました。また、数学や物理学の理論をもっと知りたいと思ったのです。1961年の末に私はオリベッティを退職し、故郷ピチェンツァから遠くないパドヴァ大学で物理学のコースを取りました。

大学生活の思い出は非常に楽しかったことばかりです。私は新しい知識を得ることに夢中でしたから、成績も非常に優秀でした。エレクトロニクスをはじめとする多くの学科で、試験に合格するために必要とされる以上の勉強をしました。毎日午後になると図書館で勉強に熱中していた日々は今では楽しい思い出です。特に、物理学の新しい概念を初めて理解出来た時、また、難解な問題が解けた時の喜びは格別でした。

1965年の末には、物理学の博士号を取得した上、最優秀学生の榮譽を得て卒業し、再び社会人になる気でいましたが、パドヴァ大学から大学に残って研究を続け、また教鞭もとるようにと勧められたため、論文を書き始めました。しかし、1学期経ったところで私は大学を去る決心をしました。大学での研究ペースが遅すぎて私には合わなかったのです。ちょうどその頃、オリベッティ時代の上司がミラノ近郊で新しい会社を設立したところだったので、その会社に入社することにしました。CERESという会社で、薄膜回路を製造する傍ら、GMe（ジェネラル・マイクロエレクトロニクス社）のイタリア代理店も兼ねていました。GMeは、フェアチャイルド・セミコンダクタ社の子会社で、世界で最初にMOS集積回路を製造した企業です。CERESでの私の役割は、GMeとのビジネスを円滑にすることでしたから、MOS集積回路の研修を受けるために、入社後間もなくカリフォルニア州サンタクララに1週間派遣されました。

シリコンバレーとの出会い

私は生まれて初めて大西洋を渡り、アメリカに着きました。当時、カリフォルニアは映画産業だけではなく、エレクトロニクス産業のメッカとしても地歩を固めつつありました。1966年の時点では、ヒューレット・パカード社やフェアチャイルド・セミコンダクタ社等がすでに有名になっており、憧れの地に着いたことで私の胸は高鳴っていました。研修コースの講師はジム・イマイで、当時はGMeの技術者でした。

new concept in physics, or figure out how to solve a difficult problem.

By the end of 1965, with a doctorate in physics, summa cum laude, I was ready again to go back to work. I was asked to stay at the University of Padua to teach and continue the research I started with my thesis, but after one semester I decided to leave because the pace of the university environment was too slow for me. I was hired by one of my old bosses at Olivetti who had just started a small company near Milano, called CERES. CERES was developing thin-film circuits and was also the Italian representative of GMe (General Micro-electronics), a spin-off of Fairchild Semiconductor, and the first company to make commercial MOS integrated circuits. I was hired to head up the business relationship with GMe and I was to be sent to Santa Clara, California for a one-week course in MOS integrated circuits.

Meeting Silicon Valley

It was my first transatlantic trip, and California loomed as the Mecca not only of the movie industry but also of electronics. Hewlett-Packard and Fairchild Semiconductor, for example, were already famous in 1966, and I was thrilled to be there. The man giving the course was Jim Imai, a GMe engineer, who three years later—how full of coincidences is life—as a consultant to Busicom, would recommend Intel as the best company to build their calculator chip set—the very project that led to the 4004.

I learned about MOS technology, a new subject in those days, and most importantly I had a peek at how people worked in the industry around the San Francisco Bay Area. I was immediately captivated: here the most important people were engineers, scientists and entrepreneurs, not politicians or pedantic professors of liberal arts like in my country. This was the place for me! I didn't know how I would come back, but I knew I would.

Back in Italy, we ordered a small number of GMe's 100-bit MOS dynamic shift registers—the most sophisticated product built in those days—but we never got delivery of them. Clearly GMe couldn't build them. Therefore my job as a Representative of this company didn't make sense, and I was reassigned to other projects. I left CERES nine months later to work for SGS-Fairchild (now SGS-Thomson) in their new R&D Laboratories. Because of my brief exposure to MOS technology, I was chosen to lead the development of the process technology for the fabrication of MOS IC's. Within six months, starting from scratch and with two assistants, I developed SGS's first MOS fabrication process and I designed two commercial circuits. I was promoted Group Leader for MOS.

One day in December, 1967, I was summoned by the R&D Manager. Speaking to

彼は、3年後にはビジコン社の顧問として、最初のマイクロプロセッサ4004の開発プロジェクトとなった電卓チップ・セットの開発をインテルに依頼するように勧めることになります。偶然とはいえ、私はイマイとの出会いに人生の不思議を感じます。

研修では当時開発されたばかりのMOS技術について学びましたが、この研修を通して、サンフランシスコ湾近辺での人々の働きぶりを垣間見たことの方が、その後の私の人生に大きな意味を持ちました。私が感銘を受けたのは、ここでは最も大切にされる人が技術者であり、科学者であり、起業家であって、故国イタリアのように政治家や物知り顔をした教養学科の教授連中ではないということでした。私はカリフォルニアこそが自分があるべき場所だと、その時思ったのです。必ずまた、ここに来ようと思いました。いつどのようにして来るかは分かりませんでしたが、どんなことがあってもカリフォルニアに来て仕事をしようと固く心に決めたのです。

イタリアに戻ると、私たちはGMeに100ビットMOSダイナミックシフト・レジスタをいくつか注文しました。それは当時、最も進んだ製品だったのですが、結局手元には届きませんでした。GMeには製造出来なかったのです。こうして私のGMeのエージェントという立場は意味を失いました。私は、他のプロジェクトに配属されましたが、9ヶ月後にCERES社を去り、SGSフェアチャイルド社（現在のSGSトムソン社）の新しい研究所に入社しました。そこでは、私がMOS技術を多少経験していたので、MOS集積回路の製造プロセス技術を開発するようと言われました。ゼロから出発して、6ヶ月経たないうちに、私は二人のアシスタントの協力を得てSGSの最初のMOS製造プロセスを開発し、市販用の回路を2個設計しました。その後、MOS開発グループのリーダーになりました。

1967年12月のある日、私は研究開発部長に呼ばれました。部長は私に英語で話しかけてきました。私に英語が通じることが分かると、部長はカリフォルニア州パロ・アルトのフェアチャイルド・セミコンダクタ社に半年間、技術者交換プログラムの一員として行く気はないかと尋ねました。私は即座にイエスと言いました。つい最近エルビアと結婚し、新しいアパートに引っ越したばかりでしたが、そんなことはどうでも良かったのです。世界で最も進んだ半導体企業であるフェアチャイルド社の有名な研究所で働くと考えただけで、私は胸の高まりを抑えることが出来ませんでした。ついに、カリフォルニアに戻るチャンスがきたのです。

私は1968年2月にカリフォルニアに着きました。冷たく霧の多い北イタリアを離れ、太陽がさんさんと輝き果物がたわわに実るバレーに着いた時、エルビアと私は天国に來たかと思いました。フェアチャイルドでの私の初仕事は、従来使用していたアルミ

me in English to see if I understood, he asked me if I was willing to go to Fairchild Semiconductor in Palo Alto, California, for six months, part of an engineering exchange program. I immediately said yes! Even if I had recently married Elvia and we had just moved into a new apartment. The prospect of working in the famous R&D Laboratory of Fairchild, the most advanced semiconductor company in the world, was truly exciting. My chance to go back to California had come.

I arrived in California in February, 1968, leaving the fog and cold weather of Northern Italy behind, to find sunny and warm weather and blooming fruit trees all over the Valley. Elvia and I were in heaven. My first project at Fairchild was to develop a new process technology to make self-aligned MOS transistors using gates made of poly-crystalline silicon instead of aluminum, as was currently done. The use of silicon as an MOS gate electrode had been demonstrated earlier at Bell Laboratories, but the method was not suitable to build integrated circuits. In only five months I developed the new process technology—called Silicon Gate Technology (SGT)—and designed and built an integrated circuit using it. This circuit was an eight-channel analog multiplexer with decoding logic that Fairchild could not reliably build with aluminum gate technology. By the end of 1968 this circuit, called 3708, became the world's first commercial IC to use gates made with polysilicon.

With SGT it became possible to make IC's up to five times faster than with aluminum gate, using half the silicon area, with much lower leakage current and with superior long-term reliability—the lack of which was the Achilles heel of MOS technology. It was this technology that made possible, a few years later, high-performance semiconductor memories, electrically programmable, non-volatile memory, and the world's first microprocessor—the 4004. SGT became the core technology for large scale integration (LSI), and today more than 90% of all IC's sold worldwide are built using silicon gates, processes that evolved from that original work.

During June 1968, Fairchild Semiconductor decided to sell their equity interest in SGS-Fairchild and I was asked to stay at Fairchild, which I gladly accepted. My first official day of work, as an employee of Fairchild, was July 1st, 1968. On that day the rumor that Bob Noyce and Gordon Moore had left Fairchild to start a new company, was spreading like wild fire in the Laboratory. Soon came the official confirmation that, indeed, the two executives had left. Few days later Andy Grove joined the new start-up, and one week later Les Vadasz, my boss, also left. Within a couple of months two dozen more people left Fairchild to join the new company. This is how Intel started.

When my boss left, I suspected immediately that Intel would use the SGT. Suspicion became certainty when Intel hired the technician specialized in making the deposition of polysilicon for me. I knew then that I was in a race and I wanted at least to

ニウムに代えて、多結晶シリコンのゲートを使用した自動調心MOSトランジスタを作る新しい処理技術を開発することでした。シリコンを使ったMOSゲートの電極は、ベル研究所ですでに実証済みでしたが、その方法は集積回路の製造には向かなかったのです。わずか5ヶ月で、私はシリコン・ゲート・テクノロジーと呼ばれる新しい処理技術を開発し、それを使って集積回路を製造しました。この回路は8チャンネルのアナログ・マルチプレクサでしたが、そこで使用したデコーティング・ロジックはアルミニウムを使う技術では信頼性に問題があったのです。3708と呼ばれたこの回路は1968年中に市販されましたが、多結晶シリコン・ゲートを使ったものとしては世界初の集積回路でした。

シリコン・ゲート・テクノロジーによって製造する集積回路はアルミニウム・ゲートのものより速度が5倍近く、その上、面積が半分ですみ、電流のリークが少なく、長時間信頼性が持続しました。電流のリークと信頼性の問題は、MOSテクノロジーのアキレス腱と言われていました。シリコン・ゲート・テクノロジーの使用によって、数年後には高性能半導体メモリや、電氣的にプログラム出来る不揮発性メモリ、そして世界初のマイクロプロセッサである4004の開発へと道が開かれました。また、シリコン・ゲート・テクノロジーは大規模集積回路の中核的な技術となり、今日では世界中で生産されている集積回路の90%以上がこの技術を使って製造されています。

1968年6月に、フェアチャイルド・セミコンダクタ社はSGSフェアチャイルド社の持ち株を売却する決定を下しました。私はフェアチャイルドにとどまるように言われ、喜んでこの申し出を受けました。フェアチャイルドの社員として最初に出勤したのは1968年7月1日でした。その日、研究室ではボブ・ノイスとゴードン・ムーアがフェアチャイルド社を辞めて、新しい会社を設立するという噂でもちきりでした。二人の幹部が退社したことは、すぐに正式に確認されました。その数日後、今後はアンディー・グロブが新会社に加わり、1週間後には私の直属の上司であったレス・ヴァダズも辞めていきました。私がフェアチャイルド社に入社して2ヶ月も経たない内に、20人以上の社員が辞めて新会社の方に移っていきました。このような経過を経て設立されたのがインテルだったのです。

私の上司、ヴァダズが辞めた時、私はすぐにインテルがシリコン・ゲート・テクノロジーを使って生産を始めるであろうと思いました。私が多結晶シリコンの蒸着を依頼している専門技術者がインテルに雇われたことを知り、私の疑惑は確信に変わりました。どうやら私はシリコン・ゲート・テクノロジーを使った熾烈な競争に巻き込まれたようです。私はどうしても最初に市場に出る製品は自分の手で作りたいと思いま

have the first product in the market with SGT. This happened during the next six months as I completed the project, and the 3708 became commercially available. Unfortunately, with the departure of so many good people, Fairchild was rapidly losing momentum and I soon became disenchanted. It was time for me to leave as well.

The 4004

In early 1970 I had a meeting with my old boss, Les Vadasz, to explore job opportunities at Intel. I wanted to move away from process development into IC design, and I wanted a challenging project. Les asked me if I understood computers and logic design, I told him about my computer work at Olivetti, and I was soon hired to head up a new project. Vadasz was very mysterious about this project, only telling me that it consisted in designing four chips for a Japanese customer, and that some of the chips involved random logic design.

In April, 1970 I started my new job at Intel and I found out that my project was called internally the "Busicom Project." Busicom was a Japanese manufacturer of calculators that had contracted Intel to develop a set of four chips to make a family of high-end calculators. Stan Mazor, an application engineer working for Ted Hoff, the Application Engineering Manager, told me the story: Busicom had visited Intel in the middle of 1969 asking Intel to turn into silicon the logic design of their calculators, which were built using small and medium scale integration (SSI and MSI) TTL components.

Busicom engineers had partitioned their design into seven complicated chips and when Hoff was asked by the marketing department to give his opinion about the project, he marveled at the complexity of the design. The Busicom design was essentially a ROM-based, macro-instruction, programmable, decimal computer based on shift-register memory, a design typical for the advanced calculators of the time. Hoff felt that there had to be an easier way to get the job done. By using Intel's RAM memory technology, he argued, it might be possible to design a small computer, far more flexible and general, and perhaps simpler, than Busicom's design.

Busicom's engineers initially appeared unreceptive to Hoff's ideas, but Hoff with encouragement by Bob Noyce, then Intel's president, continued to explore options. Eventually a family of four chips was defined and Busicom management agreed, in October 1969, to proceed with Intel's proposal and abandon their design. Mazor showed me the specifications for the chip set and the bits and pieces of circuit design that were utilized to make the feasibility study. He also told me that the next day Masatoshi Shima, a Busicom engineer who was part of the team that visited Intel back in 1969, would come from Japan to check on the progress of the project.

した。その後の6ヶ月で私はプロジェクトを完成し、出来上がった3708を市場に一番乗りさせることに成功しました。しかし、多くの有能な人材を失ったことでフェアチャイルド社が急速に失速していくのを私は感じていました。私自身、フェアチャイルドに対する夢が覚め始め、同社を辞める時期が来たことを感じ始めていたのです。

4004

1970年の初めに、私はかつての上司レス・ヴァダズに会い、インテルに就職できそうか打診してみました。私はプロセスの開発から集積回路の設計の方に移りたいと思っていましたし、また、やり甲斐のあるプロジェクトに就きたいと思っていました。レスは私にコンピュータやロジック設計の知識があるかと聞きました。私がオリベッティでコンピュータの仕事をしていたことを話すと、インテルはすぐに私を雇ってくれました。そこで新しいプロジェクトに加わりましたが、このプロジェクトについてはなかなか全容を明かしてもらえませんでした。レスはただ、日本の顧客のために4個のチップの設計をしていて、ランダム・ロジック設計が必要なチップもあるとしか言いませんでした。

1970年4月に私はインテルで新しい仕事に就きました。このプロジェクトは社内では「ビジコン・プロジェクト」と呼ばれていました。ビジコンは日本の電卓メーカーで、インテルはビジコンから、高級電卓ファミリ用に4個のチップからなるセットの開発を依頼されていたのです。当時、テッド・ホフ（エドワード・ホフ）がアプリケーション・エンジニアリングのマネージャーで、スタン・メイザー（スタンレー・メイザー）がその下でアプリケーション・エンジニアとして働いていました。メイザーによると、ビジコン社がインテルを訪問したのは1969年の半ばのことで、同社の電卓用論理回路を小規模および中規模にTTL集積回路によってシリコン化して欲しいと依頼したそうでした。

ビジコンの技術者による設計は7個の複雑なチップに区分されていました。インテルのマーケティング課から意見を聞かれたホフは、設計が複雑すぎると言いました。ビジコンの設計は、当時最新の電卓に最もよく使われていた設計で、基本的にはROMベースで、マクロ命令によりプログラミング可能で、シフト・レジスタ・メモリをベースにした10進数コンピュータでした。ホフはもっと簡単な方法があると考えました。インテルのRAMメモリ技術を使えばビジコンの設計よりも柔軟で汎用性があり、シンプルで小型コンピュータを設計できるとホフは主張しました。

ビジコンの技術者は当初、ホフの考えを受け入れないように思われましたが、ホフ

The next day Stan Mazor and I went to the San Francisco airport to greet Shima and meet each other. Shima said he had come to check the work and to please give him all the work to check. Back at the company I gave him the material I received from Mazor the day before, but Shima, after quickly scanning the material, became very angry at me because he had already seen it all back in October. He was furious that no more progress had been done since he had left Intel six months earlier; the schedule was irreparably compromised.

He kept on saying: "I came here to check and there is nothing to check. This is just idea." He held me responsible for the delay saying: "How could you have made no progress in six months?" I kept on telling him that I had just joined Intel the day before, therefore I could not have made much progress in one day, but Shima was undaunted. It took about one week for Shima to understand that he and I were in the same boat; I wanted to have those chips done as much as he did, and if he helped me we could get the job done sooner. Just one day after starting my new job, I was already six months behind schedule! That was a personal record.

I worked furiously twelve to sixteen hours a day to make up as much time as was humanly possible. First, I resolved the remaining architectural issues of the chip set, and then I laid down the foundation of the design style that I would use for it, discarding much of the earlier work. Finally, I started the logic and circuit design and then the layout of the four chips. I had to develop a new methodology for random-logic design with SGT; it had never been done before.

I called the chip set "the 4000 family." It consisted of the 4001, a 2-kb ROM with a 4-bit programmable input-output (I/O) port; the 4002, a 320-bit RAM with a 4-bit output port; the 4003, a 10-bit serial-input, parallel-output, static shift register to be used as an I/O expander; and the 4004, a 4-bit CPU.

The 4001 was the first chip designed and laid out. The first fabrication of the 4001 (called a *run*) came out in October 1970 and the circuit worked perfectly, considerably lowering my anxiety level. In November, the 4003 came out and worked as expected. In the same month, the 4002 also came out. It had a minor error which was soon diagnosed and corrected. Finally, the 4004 arrived a few days before the end of 1970. My hands were trembling as I loaded the two-inch wafer in the probe station; the moment of truth had arrived. Without the 4004 there would be no Busicom calculator, and the 4004 was a much more complex circuit than the other three.

As I probed the first circuit, I found no life. I went to the next circuit: same, no life. I started sweating. I was glad no one was in the lab at that time to see my defeat. "How could I have possibly screwed up so badly?" I was thinking. Finally I examined the wafer under a microscope and I soon found out that one of the masking layers had been

は当時インテルの社長であったボブ・ノイスの支持もあって、独自の設計を続けました。最終的には4個のチップからなるファミリにすることに決まり、1969年10月にビジコンの経営陣もインテルの提案どおりにすることに同意しました。メイザーは私にチップ・セットの仕様と、実現可能性検討のために作られた回路設計の断片を見せ、その翌日ビジコンの技術者、マサトシ・シマ（嶋正利）が日本からプロジェクトの進み具合を見にやってくると言いました。嶋は1969年にインテルに来たチームの一員だということでした。

翌日、スタン・メイザーと私はサンフランシスコ空港に嶋を出迎えに行きました。嶋は仕事の進み具合をチェックしに来たから、出来たものを全て見せてほしいと私に言いました。会社に着くと、私は前日にメイザーから預かった資料を渡しましたが、嶋はざっと目を通すと怒り始めました。私が渡したものは全て、10月に帰国する前に見たものと同じだと言うのです。彼がインテルを去った6ヶ月前から、全く進展がないのはどういうことだと、彼は非常に立腹しました。スケジュールの遅れは何ともし難く、取り返しがつかないところまで来ていたのです。

嶋は「私はチェックをするためにはるばる日本からやってきた。来てみたらどうだ。何もチェックするものがないではないか」と繰り返し言いました。嶋は私の責任だと思っただけで、「あれから6ヶ月も経ったのに、なぜ何の進展もないのだ」と責め続けます。私は前日にインテルに入社したばかりなので、たった1日では進展は無理だと繰り返し言いましたが、嶋は折れる気配がありません。1週間して、ようやく嶋も私達二人が運命共同体だということに気づいたようです。私も嶋と同様に、一刻も早くチップを仕上げたいと思っていたのです。嶋の助けがあれば、少しは早く出来るかもしれない。私にとっては、仕事に取り掛かった翌日に、すでに予定より6ヶ月遅れていたのです。このようなことは後にも先にもありませんでした。

それから私は1日12時間から16時間、死にもの狂いで働きました。出来る限りのことをして遅れを取り戻そうとしたのです。最初に、私はチップ・セットのアーキテクチャ上の残っていた問題を解決しました。次に、設計様式の基本を決めましたが、この時、それ以前の仕事の多くを見直しました。最後に、ロジックと回路設計を始め、4個のチップのレイアウトを決めました。私は、シリコン・ゲート・テクノロジーを使ったランダム・ロジック設計の方法を新たに開発しなければなりませんでした。以前にはこのような方法はなかったのです。

私はこのチップ・セットを「4000ファミリ」と呼びました。それは4ビットのプログラミング可能な入出力ポートがついた2KbROM4001、4ビットの出力ポート付き

erroneously omitted in the wafer processing. I started breathing again, my reputation was intact, I had done no wrong. It took half hour to resolve the mystery; the longest half hour of my life.

Three weeks later, in January 1971, a new run came. I received it in the evening hours and I set myself to spend the night probing it. I was praying for it to work well enough that I could find all the bugs so the next run could yield shippable devices. My excitement grew as I progressively found the various areas of the circuit working. I was alone in the lab, having only the hum of the instruments to keep me company, and I was intensely happy. By approximately 3:00 a.m. most areas of the chip had been successfully verified and I went home in a state of mixed exhaustion and elation. Elvia woke up and asked me: "Is it working?" "It works!" I said. That was the night that the world's first microprocessor was born.

By March, 1971 all the chips were ready, including four ROM chips containing the software for the calculator—we call it firmware nowadays—that Shima had developed back in Japan. Soon the good news came from Japan: "Everything works!" Now we could go into high-volume production. It took eleven months to go from idea to a fully working product, a major feat!

Now that the microprocessor was a reality, I thought the chip could be used for many other applications. However, Intel's management disagreed, believing the 4000 family was good only for calculators. Furthermore the chips had been designed under an exclusive contract; they could be used only by Busicom.

The opportunity to prove that the 4000 family was good for other applications came when the need for a production tester arose. The tester was clearly not a calculator application, so I decided to use the 4004 as the tester's main controller. Using the new electrically programmable ROM (EPROM) chips that had just been invented at Intel by Dov Frohman-Bentchkovsky, I designed the hardware and the firmware for that project, avoiding the mask-programmable 4001's, not appropriate for a one-of-a-kind project.

This work gave me much insight about what could and couldn't be done with the 4000 family. At the successful completion of the tester I had additional ammunition to convincingly lobby for the 4000 family's introduction. I suggested to Bob Noyce that perhaps Intel could trade some price concessions for nonexclusivity. (I had heard from Shima that Busicom was hurting in the market place and needed lower prices to effectively compete.)

During the summer months of 1971, Intel's management obtained nonexclusivity and decided to broadly market the 4000 family. In November 1971, the 4000 family, now known as MCS-4 (for Microcomputer System 4-bit), was officially introduced with an

320ビットRAM4002、入出力装置として10ビットの逐次入力並行出力の静的シフト・レジスタ4003、そして4ビットのCPU4004で構成されていました。

最初に設計とレイアウトをしたのは4001でした。最初に出来上がった4001（これをランと呼びます）は1970年10月に届きました。この時、回路は完璧に作動し、私の不安もかなり解消しました。11月に4003が出来上がり、期待した通りに稼働しました。同じ月に4002も出来上がりました。4002には小さなエラーがありましたが、すぐ診断して修正することが出来ました。最後の4004は、1970年が暮れる数日前に出来上がりました。2インチのウェーハをウェーハ・プローバに装着した時、私の手は震えていました。いよいよ決定的な瞬間がきたのです。4004がなければビジコンの電卓は出来ません。それに4004は他の3個のチップと比較しても、はるかに複雑だったのです。

最初の回路をテストしましたが、全く動きません。次の回路も同じで動きませんでした。私の息遣いは荒くなり、汗が始めました。その時、実験室には私以外は誰もいなかったの、ほっとしたのを覚えています。「どうしてこんなことになったのだ」と私は自問しました。ついに、顕微鏡の下にあったウェーハのマスク層が1枚、ウェーハ処理の工程で誤って処理されていないことに気付きました。「これで何とか信用を落とさずにすんだ。設計は間違っていないかったのだ」と思うと、私はやっと普段どおりに呼吸出来るようになりました。それが分かるまでに30分かかりましたが、それは私の人生で最も長い30分でした。

それから3週間後の1971年1月に処理し直したチップが届きました。私がそれを手にしたのは夕方でしたが、私はその晩、テストすることにしました。うまく稼働してくれてバグを全部見つけることが出来れば、この次に作る製品は出荷出来ると思い、祈るような気持ちでテストを始めました。回路の色々な部分が動くのを確かめながら、私はだんだん興奮してきました。その時、実験室の中は私一人でした。実験機具がたてるブーンという音の他は何一つ物音がしない中で、私は一人で喜びをかみしめていました。午前3時頃、ほとんどの部分の検査が済み、成功を確認出来ました。その時私は極度の疲労感とともに非常な幸福感に浸っていました。家に着くとエルビアが目覚まし、「うまくいったの」と聞きました。「成功だ」と私は答えました。その晩、世界初のマイクロプロセッサが誕生したのです。

1971年3月には、嶋が日本で開発した電卓用のソフトウェア（今日ではファームウェアと呼んでいます）を内蔵したROMチップ4個を入れて、全てのチップが出来上がりました。すぐに日本から良いニュースが届きました。「全て完全に機能している」というのです。これで大量に生産することが可能になりました。アイデアの段階から製

advertisement in *Electronic News* magazine. The main caption read, “Announcing a new era in integrated electronics, a microprogrammable computer on a chip.” This is perhaps the only ad I know where hyperbole was justified.

More Products

My next project at Intel was the 1201, the world's first 8-bit microprocessor, which was introduced in April 1972. The history of the 1201 is quite interesting: In December 1969, an officer of Computer Terminal Corporation, a shift-register customer of Intel, based in San Antonio, Texas, visited Intel. CTC wanted Intel to modify one of its existing products—the i3101, a bipolar 64-bit RAM—to make a 4x16 stack memory to be used in their TTL microprocessor, intended for their new generation intelligent terminal, the Datapoint 2200.

Hoff and Mazor studied the request and determined that the CTC processor, of which the stack memory was part, didn't appear much more complicated than the proposed 4004. They concluded that it would be feasible to make a single-chip, 8-bit microprocessor. They drew up a target specification, and CTC contracted with Intel for the development of such a device, a custom product embodying CTC 8-bit microprocessor architecture.

The design work on the 1201 had already started a few weeks before I joined Intel. Hal Feeney was the engineer in charge of the project. I remember my disappointment when I found out, soon after joining Intel, that the 4004 was one of two CPU-on-a-chip in development at Intel. Since I had four chips to design, and the 4004 would be my last one, Feeney—having only one chip to design—surely would be the first to create a microprocessor. But things turned out differently.

For a variety of reasons, the 1201 design was put on hold soon after it started, and resumed in January 1971, under my direction. Feeney was assigned to work for me and together we designed the 1201. Feeney did the detailed design following the same methodology I had created for the 4004.

Architecturally, the 1201 was very similar to the 4004, and its logic and circuit design, after the experience gained with the 4004, proved to be not too difficult. However, being an 8-bit CPU, it required more transistors than the 4004, about 40% more, therefore the chip was larger and more expensive to manufacture.

The design and layout of the 1201 progressed throughout 1971, and in early 1972 we received our first wafers. There were only a few minor errors, promptly corrected in a new revision of the masks. Feeney in the meantime had been transferred to a new marketing department, under the leadership of Hank Smith, created to properly commercialize the first microprocessors.

品になるまでにかかった年月は11ヶ月でした。相当な早業と言えるでしょう。

マイクロプロセッサが実現した以上、私は電卓以外にも色々なアプリケーションにチップを使えると思いました。ところが、インテルの経営陣は4000ファミリが電卓にしか使えないと信じ込んでいたので、私に同意しませんでした。さらに、このチップはビジコン社との独占契約に基づいて設計されたので、ビジコンが独占権を持っていたのでした。

間もなく、4000ファミリが他のアプリケーションにも使用出来ることを証明するチャンスがやってきました。製造テストの必要が生じたのです。テストは明らかに電卓ではありませんから、私は4004をテストの主制御装置に使用することにしました。当時インテルのダブ・フローマンとベンチコフスキーによって発明されたばかりの電氣的にプログラミング可能なROM (EPROM) チップを使って、私はこのプロジェクトのためのハードウェアとファームウェアを設計しました。単発プロジェクトには合わないので、マスク型の4001は使用しませんでした。

この仕事を通して、私は4000ファミリを使って何が出来、何が出来ないかが分かるようになりました。テストが完成すると、それを武器に私は4000ファミリの様々なアプリケーションを働きかけました。ボブ・ノイスにはビジコンが独占販売権を手放すことを条件に価格面で譲歩してはどうかと勧めてみました。(嶋からビジコンが市場で苦労していて、競争に勝つためにコストを下げなければならないことを聞き及んでいたのです。)

1971年の夏の間に、インテルの経営陣はビジコンの説得に成功し、他社への販売が可能になりました。そこで、インテルは4000ファミリを広く市場に出す決定を下しました。1971年11月には、今ではMCS-4 (マイクロコンピュータ・システム 4 - ビット) として知られている4000ファミリの広告がエレクトロニック・ニュース誌に載りました。「エレクトロニクスに新しい時代を告げる。プログラミング可能な超小型コンピュータが1チップに」これには誇張がありますが、私はこの広告に限って誇張が許されると信じています。

その他の製品開発

インテルで次に私が取り組んだプロジェクトは1201と呼ばれる世界初の8ビット・マイクロプロセッサの開発でした。1201は1972年4月に市販されました。1201の歴史を振り返ると興味深いことがあります。1969年の12月に、インテルのシフト・レジスタの顧客であるコンピュータ・ターミナル社 (CTC) の幹部がインテルを訪問しまし

The only difficult time with the 1201 came toward the end of the project, in April 1972. I was characterizing the chip when I noticed some intermittent errors at high temperature. I was under a lot of pressure because the 1201, marketed under the name "8008," had just been introduced in the market. Customers wanted it, but Intel couldn't ship it because it didn't work reliably yet. For a few days I couldn't figure out what was happening, but after a feverish week of work I understood the problem and found a solution. It was a tough problem at the crossroads of device physics, circuit design and layout: the charge stored in the gates of the transistors in the register file was leaking away due to substrate injection. I finally found a way to modify the circuit and the layout, permanently fixing the problem. The 8008 could now be delivered to the impatient customers.

Late in the summer of 1971, I went to Europe with Hank Smith to give a series of technical seminars on the 4000 family and the 8008, in anticipation of their announcement. It was my first visit to customers, and it was an important experience. I received much criticism—some of it valid—about the architecture and performance of those early microprocessors. The more computer-oriented the company I visited was, the nastier people's comments were.

When I returned home, I had an idea of how to make a better 8-bit microprocessor than the 8008, incorporating many of the features customers wanted: most important, speed, ease of interfacing, a better interrupt structure and some other new features. I drew up the architecture of a new chip intended to use the new and faster n-channel MOS process Intel had just developed to fabricate the first 4-kb dynamic memory. By early 1972 I started lobbying for the new chip. However, Intel management wanted to see how the market would respond to the MCS-4 and the 8008, before committing more resources. I was frustrated because we were wasting time, Intel was not the only company to see the potential of microprocessors and other companies were in hot pursuit, Texas Instrument, Rockwell and Motorola in particular.

Eventually, in late summer 1972, I was given permission to start the project. I hired Shima from Japan to lead the project, under my supervision. By the time Shima arrived, in November 1972, I had completed the basic architecture and the design feasibility so that detailed work could start. The new microprocessor, called the 8080, was introduced in March 1974. It was an instant success. By early 1974, the market had finally accepted the new direction and microprocessors were utilized in hundreds of different products by Intel's customers. However, many potential applications could not use microprocessors because the 4004 and the 8008 were not powerful enough. It was the 8080 that blew wide open the microprocessor market; what the 4004 and the 8008 promised but couldn't deliver, could now be done with the 8080. The microprocessor

た。同社はテキサス州サンアントニオに本社があります。CTCの依頼は、インテルが販売していた製品-i3101と呼ばれているバイポーラ64ビットRAM-を修正して、同社のTTLマイクロプロセッサ用に使用する4x16のスタック・メモリを作って欲しいというものでした。同社はこのマイクロプロセッサを同社の新世代インテリジェント・ターミナルであるデータポイント2200に取り付けようと考えていました。

ホフとメイザーが同社の依頼を検討した結果、スタック・メモリを含む同社のプロセッサは、当時提案していた4004と比較して、それほど複雑ではないという結論に達しました。二人は単一チップで8ビットのマイクロプロセッサを作ることが可能だと考えました。そこで二人が仕様書を書き、CTCはインテルに開発を依頼する契約を結びました。CTC8ビット・マイクロプロセッサのアーキテクチャを実現するカスタム品の開発契約です。

私がインテルに入社する数週間前に、1201の設計は始まっていました。このプロジェクトの技術者はハル・フィーニーで、私はこのようなプロジェクトが進んでいることを入社間もなく知った時、正直に言うのがっかりしたのを覚えています。インテルが開発している1チップのCPUは4004だけではなくたと知り、私はフィーニーに先を越されると思いました。私は4個のチップを設計しなければならず、しかも4004は最後に設計することになるのに対して、フィーニーの方はたった1個のチップを設計すれば良かったのです。ところが、結果は私の心配とは逆になりました。

さまざまな事情があって、1201の設計は開始間もなく休止になり、1971年1月に再開した時は、私が責任者になっていました。フィーニーは私の下で働くようになり、私達二人は1201の設計を完了しました。フィーニーは、私が4004を作ったのと同じ方法を取って設計の細部を担当しました。

アーキテクチャを見る限り、1201は4004と非常に似ていて、ロジックと回路設計は、4004の経験があったのでそれほど難しくはありませんでした。しかしながら、8ビットのCPUということで、4004よりは多くの(40%多い)トランジスタが必要でした。そのため、チップのサイズを大きくする必要があり、製造コストがかかりました。

1201の設計とレイアウトは1971年を通して進展し、1972年の初めには最初のウェーハが出来上がりました。小さなエラーが少しありましたが、すぐにマスクを作り直して修正しました。その間、フィーニーはハンク・スミスが率いる新しいマーケティング課に配属になり、最初のマイクロプロセッサの発売に尽力しました。

1201プロジェクトで唯一の困難な時期は、プロジェクトの終了間際の1972年4月でした。私はチップの特性評価をしている時に、高温下で断続的なエラーがあることに

had come of age; and its value could no longer be debated.

Due to the success of the 4004, 8008 and other projects I led, and with the rapid growth of Intel, my level of responsibility steadily increased. By early 1974 I was promoted to the position of department manager in charge of all MOS IC design, except for dynamic memories. I had 80 people in my department and more than a dozen projects underway simultaneously. Among my accomplishments I remember in particular a custom circuit I designed for Mars Money, Inc. in 1972. It was the first circuit to combine random logic with on-chip EPROM to create the function of an adaptive coin reader. In 1972 I also designed a chip that allowed the 4004 to interface with standard memories, in particular EPROMs, useful for low-volume applications, where the expense and time required for ROM tooling was prohibitive. In 1973 I designed the 4040, a much improved successor to the 4004. And in 1974, with Dick Pashley, I created the first fast, static, n-channel, 5-volt RAM, called the 2102A, by combining depletion load transistors with low-voltage, n-channel MOS technology. We achieved an access times of 80 nsec where before 300 nsec was hard to get.

My nearly five years with Intel were the most productive time of my engineering career. I personally designed or supervised the design of at least two dozen commercial ICs—I don't remember them all—growing immensely in both my technical and managerial competence. By the end of summer 1974, however, I grew restless. Intel had become a large company and the environment had become a bit stifling to me. Intel was started with the mission to be a memory company, and microprocessors were important only insofar as they helped sell more memories; I didn't like that.

Moving On

My time at Intel, while extremely productive, had not been completely satisfying. Most things I did I had to push and argue to get done, and I felt unappreciated, since the attention of management was primarily on the memory business. The idea of starting my own company, a company dedicated exclusively to microprocessors, began to surface in my mind. Silicon Valley, even in 1974, was a hotbed of start-up companies. Why not do what Noyce and Moore had done six years before? I approached Ralph Ungermann, one of my managers, and asked him: "How about starting our own company to make microprocessors?" "Let's do it!" he said immediately. Without any specific plan, having approached no one else, Ralph and I left Intel and founded Zilog.

We rented an office in downtown Los Altos in a shopping mall, and we set out to figure out what we were going to do. The first product that came to my mind was a single-chip microcomputer, I called it the 2001. It was a full computer on a chip, not just the CPU. In other words, I wanted to integrate an 8-bit microprocessor with the ROM,

気付きました。当時、1201はすでに「8008」という名で発売されたところだったので、私は非常にプレッシャーを感じました。顧客は1201を欲しがりましたが、インテルとしては信頼性が不完全だったので出荷出来なかったのです。数日間、私は何が起きているのか分かりませんでしたが、1週間かけて必死になって突き止めた結果、問題を見つけ出し、解決することが出来ました。それは、デバイス物理学、回路設計、レイアウトにまたがる難しい問題でした。レジスタ・ファイルのトランジスタ・ゲートに蓄積された電荷が、基板への注入によってリークしていたのです。最終的には、回路とレイアウトを修正する方法を見つけ出し、この問題を完全に解決することが出来ました。こうして8008をイライラして待っている顧客のもとに送り出すことが出来ました。

1971年の夏の終わりに、私はハンク・スミスとともにヨーロッパに赴き、間もなく発表予定の4000ファミリと8008の技術セミナーを開きました。顧客を訪問したのは初めてでしたが、私にとって貴重な体験となりました。これら初期のマイクロプロセッサのアーキテクチャや性能に関する多くの批判を受けましたが、妥当な批判もありました。コンピュータの導入に熱心な企業ほど、批判も厳しいものがありました。

帰国してから、私は8008よりも高性能で顧客が望む多くの機能をもった8ビットのマイクロプロセッサの製造方法を考えつきました。最も重要なスピードを上げること、それからインターフェースを向上すること、割り込み構造の改良、それに二三の新しい特色を追加することなどです。私の構想は、最初の4Kbのダイナミック・メモリ製造用にインテルが開発したばかりの高速nチャンネルMOSプロセスを使用した新しいチップのアーキテクチャでした。1972年の初頭まで、私はこの新しいチップの開発を始めるように経営陣の説得を試みましたが、経営陣はまずMCS-4や8008の市場での反応を見てからにしたい意向でした。私は時間を浪費しているのを感じて不満でした。当時、マイクロプロセッサの開発にかけていたのはインテルだけではありませんでした。特に、テキサス・インスツルメント、ロックウェル、モトローラ等の企業が熱心にマイクロプロセッサのプロジェクトに取り組み、熾烈な競争があったのです。

1972年の夏の終わりに私はついに新しいプロジェクトを始める許可を得ました。私が監督するこのプロジェクトのリーダーとして、私は嶋を日本から呼びました。嶋は1972年11月に到着しましたが、それまでに私は基本設計と実現可能性の検討を完了し、細部の仕事がすぐに始められるように準備していました。新しいマイクロプロセッサは8080と名付けられ1974年3月に発売されましたが、すぐに市場でも大成功を収めました。1974年の初めまでに市場は新しい趨勢を受け入れ、マイクロプロセッサはイン

RAM and input-output electronics, to create a single-chip computer for simple, low-cost applications.

This device would have been the first of its type in the market—now these chips are called microcontrollers and represent the bulk of the consumption of devices containing microprocessors. But after further reflection, I decided against the 2001. I couldn't see how we could possibly get the millions of dollars required to start our own wafer fabrication facility, and without it we could not compete with companies having their own manufacturing capability. We had to purchase wafers from wafer foundries at prices much higher than normal manufacturing cost; a major problem for a price sensitive device like the 2001. I reluctantly abandoned the 2001 idea and turned my attention to a less cost-sensitive product. I still remember a Saturday morning in December 1974, when the basic idea for the Z80 came to me. I said triumphantly to Ralph, "Yes! Let's make a super 80!" By that I meant a product that was instruction-set compatible with the 8080, but much more powerful than the 8080.

During the following months I developed the basic architecture, the instruction set and the design feasibility of the Z80, using a manufacturing process with depletion loads, similar to the one I co-developed at Intel for fast memories. The Z80 was conceived from the start to be part of a family of peripheral chips working seamlessly together. The other members of the family were a programmable parallel input-output port, a programmable counter timer, a direct memory access controller and a serial input-output controller. By adding standard memory to these chips, a powerful computer could be built.

By April 1975, Ralph and I were able to secure a financing of \$500,000 from Exxon Enterprises, the venture capital (VC) arm of Exxon Corporation, then the largest corporation in the world, and one of the few companies active in venture financing in 1975. 1975 was a recession year and most VC firms had been seriously affected by the excesses of the late sixties and early seventies. There was no money to go around. During 1975 the total VC investment in the USA was \$10 million, the lowest it has ever been. We considered ourselves lucky to have found some money.

In April 1975, I hired Shima from Intel to lead the Z80 project and during the next few months, Ralph and I put together the team that would develop the Z80 microprocessor, the development system with its software, and would then proceed to design the remaining peripheral chips—eleven people in all. By March 1976, the Z80 was fully functional and the development system ran for the first time with an actual Z80 chip instead of its emulator hardware. We had done all that work in eleven months, spending a little more than \$300,000, an incredible feat even in those days.

The Z80 was announced in May, 1976 with a color ad in *Electronic News* whose

テルの顧客によって何百もの製品に使用されるようになっていたのです。しかしながら、4004も8008もパワーが不足していたため、使用できないアプリケーションも多くありました。パワー不足を解消してマイクロプロセッサの市場を大きく広げたのは、8008に次いで開発された8080でした。8080には、4004や8008に期待されながら出来なかった機能がありましたから、8080の登場とともにマイクロプロセッサの時代が本格的な幕開けをしたと言えると思います。8080以降は、マイクロプロセッサの価値に疑念を抱く人はいませんでした。

私が携わった4004、8008、その他のプロジェクトが成功し、また、インテルが急成長したため、私は責任の重い職務に就くようになりました。1974年の初めに私はダイナミック・メモリを除く全てのMOS集積回路の設計を統括するマネージャーに昇進しました。私の課には80名の部下がいて、十指に余るプロジェクトが同時に進行していました。そこでさまざまな業績を上げましたが、中でも忘れられないのは1972年にマース・マネー社のために私が設計したカスタム回路です。この回路は、ランダム・ロジックとチップ上のEPROMを組み合わせてコインを読みとる世界初の装置でした。1972年には、この他にも4004をスタンダード・メモリ、特にEPROMにインターフェースするチップを設計しました。EPROMは、ROM仕上げにかけられる時間と費用が限られている少量生産用のアプリケーションに適しています。1973年には4004を大幅に改良した4040を設計しました。さらに1974年には、ディック・パシュレーと共同で世界初の高速n-チャンネル5ボルトの静的RAM、2102Aを開発しました。低電圧の空乏負荷トランジスタをnチャンネルMOSテクノロジーと組み合わせることで、私達はアクセス時間を80ナノ秒にすることに成功しました。ちなみに以前は300ナノ秒にすることも難しかったのです。

インテルに在籍していた5年間は、技術者として最も充実した時期でした。私自身が設計したか、もしくは設計を監督した集積回路は、20種類以上が市販されましたが、それら全てを覚えているわけではありません。このように、技術面でも経営面でも多くの業績を上げたのですが、1974年の夏が終わる頃には、私はなぜか落ち着かない気分になっていました。インテルは巨大な企業に成長し、私は息苦しさを感じるようになってきたのです。インテルはもともとメモリ製造を目的として設立されたので、マイクロプロセッサはメモリの販売を促進するものとして位置づけられていました。私はそれも気に入らなかったのです。

転職

caption said: “The battle of the 80’s” and compared the Z80 to my prior chip, the Intel 8080, showing its superior performance.

The Z80 became wildly successful, in fact, even today, twenty-one years after its introduction, it is still produced in high volume. More than one billion Z80 have been produced so far by a number of suppliers scattered throughout the world.

With the Z80 my engineering career ended. As CEO of Zilog, the task of leading a fast-growing company soon took all my energy. From that point on my career took a turn and I became an entrepreneur and CEO, starting and leading high-technology companies in Silicon Valley.

It would take too long to describe the history of Zilog, the many products we created, the good and the difficult times, and the vital role that Zilog played in the early years of the microprocessor. At Zilog I learned the difficult lessons of running a company in a highly competitive business. I did many things right and many things wrong, and, of course, I learned from my mistakes much more than I learned from my successes.

In the late 70s, Exxon Enterprises, which had controlling interest of Zilog, decided to consolidate all its investments in information technology into a group called Information Systems Group, publicly stating its intention to become a dominant force in the information business, and targeting IBM as the company to beat. This is not what I expected. Ralph and I wanted to create a public company, not a division of Exxon Information Systems! Exxon Enterprises had originally agreed with our vision, but now the plan they obviously had had all along began to take shape. This turn of events was a major blow to Zilog and one of the key reasons that induced IBM to choose Intel instead of Zilog microprocessors in their first personal computer. That choice sealed the fate of Zilog as an also ran. At the end of 1980, discouraged after unsuccessfully trying to convince Exxon Enterprises to divest themselves from Zilog, I left the company.

I learned the hard way that technical excellence is only one of the ingredients necessary to succeed in business, and that the best product doesn’t necessarily win in the marketplace.

Entrepreneurship

The following seventeen years I co-founded and was the CEO of two other companies, Cygnet Technologies and Synaptics. At Cygnet we developed and introduced in the market in early 1984 an intelligent telephone that, connected to a personal computer, allowed the PC to become a voice and data workstation dedicated to managers, people concerned with communication much more than with computing.

At Synaptics, the company I started in 1986 with Professor Carver Mead of the

インテルで過ごした期間に私は多くの業績を上げましたが、だからといって完全に満足していたわけではなかったのです。多くのアイデアを実現するためには、意見を主張し無理押しする必要がありました。経営陣の主な関心事はメモリでしたから、私は自分が正当な評価を受けていないように感じていました。その頃、自分で会社を設立してみよう、マイクロプロセッサ専門の会社にしよう、という構想が私の頭の中に浮かんできたのです。1974年当時でも、シリコンバレーは多くの起業家が集まる場所でした。6年前にノイスとムーアがインテルを設立したように、私も会社を設立しても良いのではないかと私は思いました。私は上司の一人であるラルフ・ウンゲルマンに「マイクロプロセッサ専門の会社を設立することをどう思う」と聞いてみました。「やろうじゃないか」と、彼は即座に言ったのです。これといった計画があったわけではなく、誰にも声もかけずに、ラルフと私はインテルを辞め、ザイログ社を設立しました。

ロス・アルトスの中心にある商店街の中に私達はオフィスを借り、これから何をするのか計画を立てました。最初の製品として私が思いついたのは、1チップのマイクロコンピュータで、私はそれを2001と呼びました。2001はCPUだけでなく、全コンピュータ機能を1チップに搭載したコンピュータとなるはずでした。言い換えれば、私は8ビットのマイクロプロセッサとROM、RAM、入出力装置を1個のチップに集積し、シンプルで低価格のアプリケーション向け製品を実現しようとしたのです。

当時、このようなコンピュータはまだ市場に出ていませんでした。今ではこのようなチップのことをマイクロコントローラと呼び、多くの装置に組み込まれて大量に消費されています。しかし、熟慮した結果、私は2001の企画を取りやめました。自前のウェーハ製造施設を建設するためには何百万ドルもの費用が必要となりますが、そのような資金を調達出来る見込みがなかったからです。もし、自前の製造施設を持たなければ、通常の製造コストよりはるかに高い価格でウェーハを購入しなければならず、それでは企業間の価格競争に勝てないでしょう。2001のような製品は価格に敏感なのです。こういう訳で残念ながら2001の構想は諦めなければならませんでした。私は、それほど価格に敏感でない製品はないかと考えました。1974年12月の土曜日の朝、私はZ80の基本構想が浮かんだ時のことを今でもよく覚えています。私は勝ち誇ったようにラルフに言いました。「スーパー 80を作ろうじゃないか」その時私の頭にあったのは、8080と互換性のある命令セットで、しかも8080よりはるかにパワーのある製品でした。

それから何ヶ月か、私はZ80の基本設計を練り、命令セットを開発し、実現可能性

California Institute of Technology, we set out to develop the technology for learning systems, based on artificial neural networks and analog VLSI. After six years of research, we came to the conclusion that while neural networks were superior in many ways to conventional technology for recognizing complex patterns, there was not enough architectural commonality to warrant the design of complex analog VLSI learning chips. We decided to use our expertise in neural network technology to pursue human to computer interface products, based on giving senses to the computer—touch, hearing and sight. In 1995 Synaptics introduced the touchpad, a new type of pointing device based on determining the position of a finger in a sensing surface—just like the skin of the computer. The touchpad has been very successful, capturing in three years 50% of all notebook computers sold worldwide. The company has grown rapidly and is quite successful.

Synaptics has also developed a system for computer entry of Chinese characters using a pen and a special touchpad. This handwriting recognizer is based on neural network technology and surprisingly allows faster data entry than writing by hand. This important result is achieved by recognizing the characters as they are written. Since, on average, only half the number of strokes forming a Chinese character need to be written before the computer can correctly recognize the character, the user can write twice as fast with the computer than writing by hand.

At the personal level, I have many interests. Understanding how the brain works is one of them, and many years ago I spent four years studying neurobiology to gain some insight into this marvelous creation of nature. Studying the brain I got interested in consciousness, this most mysterious property of our brain. Consciousness is our ability to know that we know, to form pictures and feelings in our body based on our sensory information and our thoughts. These images form in the screen of our mind and are intelligible to some virtual *entity* inside our head. While we seldom think about consciousness, we use it all the time—without it, we wouldn't even be aware of existing, we would behave just like sleep-walking automatons.

But what is consciousness, really? How can it possibly emerge from the operation of a complex machine? If it can, then it will be possible to make a computer which is conscious; maybe even a computer which is more intelligent than we are. If consciousness, on the other hand, exists outside the material world, how do we reconcile this possibility with physics? How does it connect with the material world? How does it exchange information with the objects described by quantum mechanics?

These are clearly questions at the boundary between physics and metaphysics, but then, what do you expect from the son of a philosophy professor?

My life has been good and productive and I am very grateful for it. I feel fortunate

を検討しました。そのためには、インテルで私が高速メモリ用に共同開発した方法に似ている空乏負荷をもつ製造工程を用いました。構想の初期段階から、Z80は周辺チップを含めたファミリの一部として開発するつもりでした。ファミリには他に、プログラム可能な並行入出力ポート、プログラム可能なカウンタ・タイマ、ダイレクト・メモリ・アクセス制御装置、逐次入出力制御装置から構成され、これらのチップにスタンダード・メモリを追加すれば、パワフルなコンピュータが製造出来るはずでした。

1975年4月までに、ラルフと私はエクソン・エンタープライズから50万ドルの融資を受けることが出来ました。エクソン・エンタープライズは、当時世界一の企業であったエクソンのベンチャー・ビジネスへの投資会社で、1975年当時ベンチャー企業に投資してくれる数少ない企業でした。1975年と言えば景気が後退していた時期で、多くのベンチャー・ビジネスへの投資会社は60年代後半から70年代初頭にかけて行った過剰投資によって深刻な影響を受けていました。マネーサプライが極度に落ち込んでいたのです。ちなみに1975年のベンチャー企業への投資額は全米で史上最低の1,000万ドルでした。ですから、いくらかの資金を得ることが出来たことを、私達は非常に喜んだのです。

1975年4月に、私は嶋をインテルから呼びZ80プロジェクトを進めてもらいました。その後の数ヶ月は、ラルフと私で総勢11名からなるチームを作りました。このチームはZ80マイクロプロセッサとソフトウェア付きの開発システムを開発し、その後残りの周辺チップを設計する予定でした。1976年3月には、Z80の機能が全て出そろい、開発システムもエミュレータ・ハードウェアではなく、実際のZ80で動き始めました。私達はこれらの仕事を全て11ヶ月でやり遂げたのです。しかも、かかった費用は30万ドル強でした。当時の水準で考えても、これは驚くべき快挙でした。

Z80の発表は1976年5月に行われました。エレクトロニクス・ニュース誌にカラー広告を出したのですが、そのタイトルは「80戦争」となっており、Z80と私が以前開発したインテル8080を比較して、Z80の優れた性能をアピールするものでした。

Z80は非常な成功を収めました。実際、あれから21年たった今日でも、Z80は大量生産されており、今までに10億個以上のZ80が生産され、製造元も世界中に点在しています。

Z80の開発をもって、私は技術者としてのキャリアに終止符を打ちました。ザイログ社の経営最高責任者として、急速に成長している同社の舵取りをすることに私は全エネルギーを注ぎ込みました。それからの人生を私は、起業家として、また、経営最高責任者としてシリコンバレーにハイテク企業を起こすことにかけています。

to have been able to live in one of the most intellectually stimulating places on Earth—Silicon Valley—and to have had the loving support of my wife Elvia. God willing, I intend to continue to work for the rest of my life to advance the state of knowledge in the area of artificial intelligence. I firmly believe that our search to learn how to make a machine intelligent will naturally lead us to deepen our understanding of our human nature, learning what are the unique properties that make us human, and what is our role in this wondrous universe. I wouldn't be surprised if in due time we will discover that we all possess a deep spiritual dimension connecting us to the purpose of the Cosmos.

ザイログ社の歴史については、手短にお話ししましょう。多くの製品を手がけ、順調な時も困難な時もありましたが、初期のマイクロプロセッサにおいて、ザイログ社は重要な役割を果たしました。ザイログ社で、私は競争の激しいビジネスの世界で企業を経営することの難しさを学びました。正しい判断もしましたが、間違った判断も数多くし、成功よりも失敗を通して多くのことを学びました。

1970年代の後半には、ザイログ社の支配的利権を持つエクソン・エンタープライズが、情報技術関係への投資を全てインフォメーション・システム・グループに統合する決定を下しました。この時、エクソン・エンタープライズはIBMを打ちのめし、情報ビジネスにおける巨人になるつもりだと公言したのです。私はこのようなことになるとは全く思っていませんでした。ラルフも私も独立した株式会社を設立しようと思っていたので、エクソン・インフォメーション・システムの一部になるなどとは思っていませんでした。もともとはエクソン・エンタープライズも私達の計画に同意していたのですが、同社はおそらく以前からこのような計画を練っていて、それが動き始めたとは思えませんでした。ザイログ社にとって、これは一大事でした。IBMがザイログ社ではなくインテルのマイクロプロセッサを最初のパソコン用にした裏には、この1件があったと思います。この時のIBMの選択によって、ザイログ社の命運はつきたのです。私はエクソン・エンタープライズにザイログ社から手を引いて欲しいと頼みましたが説得に失敗し、1980年の終わりに失意のうちに退社しました。

この辛い経験から、卓越した技術もビジネスに成功するための一要素にすぎないということを知りました。また、最高の製品が必ずしも市場を席巻するわけではないことを学んだのです。

起業

その後の17年間に、私はさらに2社を共同で設立し、経営最高責任者を務めました。シグネット・テクノロジー社とシナプティクス社です。シグネット・テクノロジー社では、1984年初めにインテリジェント電話を開発し発売しました。この電話をパソコンに接続すると、パソコンが音声とデータのワークステーションの働きをします。計算機能よりもコミュニケーション機能を重視する経営者向けの製品です。

シナプティクス社の方は、カリフォルニア工科大学のカルバー・ミード博士とともに1986年に設立した企業で、私達は人工ニューラル・ネットワークとアナログ超大規模集積回路を使った学習システムの技術開発を始めました。6年間の研究の末、私達

が達した結論は、ニューラル・ネットワークは既存の技術と比較して複雑なパターンの認識に優れているものの、複雑なアナログ超大規模集積回路の学習チップの設計を保証するには、アーキテクチャの共通性が不足しているというものでした。私達はニューラル・ネットワーク技術の専門知識を生かして、ヒューマン・コンピュータ・インターフェースの製品の開発をすることに決めました。そのために、コンピュータに触覚、聴覚、視覚といった感覚を持たせる研究を進めました。1995年には、シナプティクス社からタッチパッドを発売しました。タッチパッドは、まるでコンピュータの皮膚のように指で触られた場所を知覚する、新しいタイプの位置決め装置です。タッチパッドは大成功し、3年間で世界中で販売されているノートパソコンの50%に使用されるようになりました。タッチパッドのおかげでシナプティクス社も急成長し、成功しています。

また、シナプティクス社ではペンと特別なタッチパッドを使った漢字の入力装置を開発しました。手書きの漢字を認識する装置は、ニューラル・ネットワーク技術を利用していますが、驚いたことに実際に手で文字を書くよりも早い速度で入力出来るのです。つまり、この装置はユーザが漢字を書き始めるのと同時に読み取りを始めるので、通常半分くらいの画数を書き終えると、正しく判断してしまいます。ですから、ユーザは手書きの倍の速度で入力出来るわけです。

個人的には、私は今、色々なことに興味を持っています。脳の働きにも非常に関心を持ち、実際、何年か前には神経生物学の研究に4年かけて、自然の手によるこの素晴らしい創造物を理解しようとしていました。脳の研究を続けるうちに、私は人間の脳の中で最も神秘的な意識の領域に関心を深めていきました。意識とは、私達が知っていることを知る能力、私達が知覚器官から得た情報や頭の中で考えたことを基に、それらを視覚化したり何かを感じる能力のことです。これらのイメージは心の中のスクリーン上に描かれ、私達の頭の中にある、どこかまだ判明していない場所で理解されるのです。私達が意識について考えることはめったにありませんが、私達は意識を常に働かせています。もし意識がなかったら、自分が存在していることさえ気付かず、動いていても、それは夢遊病患者か自動人形の動きと変わらないのです。

それにしても意識とは一体何なのでしょう。どうすれば、複雑な機構を操作することで機械に意識を持たせることが出来るのでしょうか。もしそれが可能なら、意識を持ったコンピュータを作ることが出来るでしょう。もしかしたら人間以上に知能のあるコンピュータが出来るともかもしれません。その反面、もし意識というものが物質世界以外のところに存在しているのなら、そのような可能性を物理現象として説明するこ

とは困難になります。だとしたら、意識はどのように物質世界と結びついているのでしょうか。どうやって量子力学で説明出来るような物質と情報を交換出来るのでしょうか。

このような問いは物理学と形而上学の境界に関するものですが、私の父は哲学の教授でしたから、私にとっても身近な問いでもあるのです。

今、自分の半生を振り返ってみると、非常に思い出深く、また、実りの多い人生を送ってきたことに感謝しています。特に、地球上で最も知的な刺激に満ちている場所であるシリコンバレーで人生の大半を過ごせたことを非常に幸運だったと思います。また、妻エルビアの心からの支援を受けられたことにも感謝しております。出来ることなら、私は残りの人生を人工知能の分野の研究にかけたいと思っております。知的なマシンを作る研究をすることで、逆に人間性への理解も進むのではないかと私は思います。また、このような研究を通して、人を人たらしめている人間の特性について学び、この素晴らしい宇宙における私達人間の役割を考察することが出来ると思います。もしかしたら、人間一人一人の心の奥深い部分に、宇宙（コスモス）の目的と結びついた深い精神の次元があるのかもしれない。このような発見が遠くない将来にあっても、私は驚かないと思います。

稲盛財団 1997——第13回京都賞と助成金

発 行 1999 年 8 月30日

制 作 財団法人稲盛財団

京都市下京区四条通室町東入函谷鉾町88番地 〒600-8009

電話 (075) 255-2688

ISBN4-900663-13-1 C0000