

# イメージセンサのイノベーション

永峯 英行

同志社ビジネスケース 07-02  
2007年3月



# イメージセンサのイノベーション

同志社大学大学院 総合政策科学研究科 博士後期課程

技術・革新的経営研究(TIM)コース

同学 技術・企業・国際競争力研究センター リサーチアソシエイト (嘱託研究員)

永峯 英行

---

本ケース・スタディは、同志社大学大学院 博士後期課程の永峯英行がクラス・ディスカッションの基盤になる資料として自ら作成したものであり、推薦の言、一次データの源、経営における有効なあるいは無効な実例としての使用を意図するものではない。著者は今回のケース・スタディに際し、快くインタビューに応じて頂いた越智成之氏、川名喜之氏、久保証治氏、井手祐二氏、そしてこの偉大なイノベーションの創出に関わった全ての科学者・研究者・技術者に感謝と尊敬の意を示すものである。またケースライティングに当たって、懇切丁寧にご指導頂いた同志社大学大学院 山口栄一教授にこの場を借りて深く感謝の意を表したい。但し、本事例に於けるいかなる間違いや欠落もすべて著者に帰する。

Copyright © 2007 by Hideyuki Nagamine. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means – electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise – without permission from the Doshisha Business School. 著者及び同志社ビジネススクールの許諾なしにこの出版物の一部または全てを複製複写、情報検索システムへの保存、またいかなる形態いかなる手段(電子的、機械的、写真複写、録音録画ほか)により配信することを禁ず。

## 1. ソニーにおける CCD の研究開発プロジェクト

これは、現在のイメージング産業を築いた男たちの物語である。

### プロローグ 誰かが固体カメラをやらなければならない

エサキダイオードの研究に没頭した東京工業大学理工学部を卒業後、1962年にソニー(東京通信工業)本社の技術部に配属された越智成之(1938~)<sup>1)</sup>は、オーディオの研究に従事した後、配属から5年後の組織変更とともに研究部、厚木の半導体事業部と渡り歩き、中央研究所(以下、中研)に再び戻ってきた1970年12月、たった一人きりでCCD(Charge Coupled Device;電荷結合素子)の研究に着手した。

越智自身は、それまで同社の電卓であった「SOBAX」用MOS<sup>2)</sup>の開発を手がけていた。しかし、トランジスタラジオ向けのバイポーラ・トランジスタ<sup>3)</sup>によって日本の半導体産業を立ち上げ、世界一のバイポーラ半導体メーカーだと自負していたソニーの半導体事業部においては、「MOSのような不安定なデバイスはやるべきではない。バイポーラの方が優れている。」という意見が大半を占めており、MOS-ICの開発に全く力を入れていない状況であった。

そして電卓戦争に突入すると、1968年に発売されたSOBAXには、結局MOSトランジ

スタは採用されず、その後、電卓メーカーの両雄であったシャープとカシオによって、最盛期で 60 社以上あった参入メーカーが次々と撤退に追い込まれ、SOBAX も例に漏れず姿を消した。

次の研究テーマを何に設定すべきか。越智はひたすら考えた末に CCD を選んだ。越智がこの時 CCD をテーマに選んだ理由には、当時のソニーの全社的な技術戦略が背景にあった。自らの企業名の語源であるラテン語の「SONUS (ソヌス)」、つまり「音」を扱う最初の量産商品であった日本発のテープレコーダ(1950 年)に引き続き、日本発のトランジスタラジオ TR-55(1955 年)、トランジスタマイクロ TV(白黒)と、ソニーは他社に先駆けて次々と革新的なヒット商品を連発させていく。そして 1968 年には当時としては最大の開発投資だったものの、わずか 20 億円の投資で後に年間 1 兆円を超えるビジネスに育ったトリニトロンが完成し、記念碑的存在となったトリニトロンカラーTV「KV-1310」を世に送り出した後、ソニーは次なる大型商品を VTR (U マティック) と位置づけ、経営資源を集中投下していく。1969 年、ソニー、JVC、松下電器産業の 3 社でフォーマットの合意をした後、1975 年には、VHS と激しい規格争いを繰り広げたベータマックスを商品化した。つまり越智が CCD の研究に着手した 1970 年は、ソニーにおける最大の技術開発テーマが VTR であり、全社がそれに集中していたのである。越智は当時の自身の選択についてこう振り返った。「SOBAX 用 MOS-IC の次に何をやろうかと考えていた時、会社は全社的に VTR に向かっていた。でも VTR に会社が全力で経営資源を投入している時に、そうした流れに研究所が巻き込まれていては、新しい研究なんかできませんからね。次にやるべきは何か。この次の大型商品がビデオカメラであることは間違いないということは、良く考えれば必然でした。だから、誰かがビデオカメラをやっておかなければならないと考えていた時に、丁度たまたまベル研で CCD が発明されたので、私は固体のイメージセンサをやろうと決めました。」

当時のビデオカメラの「眼」の役割を担っていたのは「撮像管」であり、真空管の一種であるこの部品は、電子を飛ばすための一定の真空空間が不可欠となるため、その小型化には原理的な限界があった。加えて、サイズの問題以外にも撮像管には以下の欠点があった。

- (1) 電源を点けてすぐに使うことができない
- (2) 動作電圧が高く、消費電力が大きい
- (3) 焼き付けがあるため、寿命が短い

しかし CCD のような固体素子ならば、撮像部を大幅に小型化、すなわちビデオカメラを劇的に小型化できる、そしてその他の撮像管の欠点も克服できることに越智は目を付けたのであった。

### 15 年間のデスバレー

現在でこそソニーの製品群の中において「優等生」と言われる程、収益上の貢献を果たしている CCD であるが、この半導体は実に 10 年以上、開発ターゲットであった家庭用ビデオカメラへの搭載までには 15 年間にも及ぶ気が遠くなる程の地道な研究開発の後に完成し、他社の追随を許さない強力な商品作りに貢献した。この 10 年超という研究開発期間はいわゆる「デスバレー」であり、事業化できていないため、当然のことながら売上貢献もなく、

研究開発費だけがコストとして計上されていくという状況が続いた。

米国で発明がなされ、日本において10年を優に超えるような長期間に渡る研究開発が行なわれた後に製品化・事業化され、消費者のライフスタイルを大きく変革する程の画期的なブレイクスルーに結実した日本発の代表的なイノベーションとして、液晶ディスプレイ（RCAのDavid Sarnof研究所→シャープ）が挙げられるが、CCD（ベル研究所→ソニー）もその一つである。加えてCCDは、ベル研のバーディーン、ブラッテン、ショックレイによるトランジスタの発明以来、常に米国を師としてきたわが国の半導体産業にとって、初の「非キャッチアップ型製品」、つまり日本においてイノベーションが結実した最初の半導体デバイスであった。

8mmビデオカメラに始まり、デジタルスチルカメラ(DSC)やデジタルビデオカメラ(DVC)、そして携帯電話用カメラのキーデバイスであるCCDは、米ベル研究所が基本構造を発明した。CCDは、1975年前後から世界の各社が一斉に製品化に取り組んだものの、結局は「ノイズ」や「画像欠陥」といった、イメージセンサ特有の技術的な困難を克服できずに、日本企業の数社を除いて殆どが撤退していった。現在の市場シェアは国内3大メーカー、つまりソニー、松下電器産業、シャープの3社の日本企業が市場を独占しているが、この背景にはCCDが他の半導体、特にメモリ製品と異なり、微細化追求のための生産規模と資金力のみが競争優位の源泉とならない特殊な半導体デバイスであることが挙げられる。

越智はインタビューの中で、CCDという半導体デバイスが有する特殊性において、もう一つ重要な点に言及した。何故15年間ものデスバレーを乗り越えることが出来たのかという質問に、彼は次のように答えた。

「面白かったからです。面白くなきゃ、会社の命令だと言っても誰もやらないでしょう。研究者やエンジニアって、本来わがままですよ。誰にどうこう言われたって面白くなければ動かないし、面白くない仕事は続かない。半導体っていうのは、作っても石ころだから、面白くもなんとも無い。しかし幸いCCDというのは、これまでのようなんともすんとも言わない半導体と違って、結果として絵が出ますから、皆が関心を持っていたんです。何より研究開発している我々が一番喜びました。非常に分かり易いデバイスです。」

## CCD 誕生の歴史

ここで、CCD誕生の経緯を簡単に振り返っておこう。1967年、コンピュータ用のメインメモリの研究過程において、米国ベル研究所（以下、ベル研）のA. H. Bobeckにより磁気バブル素子<sup>4</sup>が開発された。当時Bobeckのボスであり、ベル研の副社長であったJack Mortonはこの磁気バブル素子と同等の機能を半導体で実現できないかと考えた。そして1969年、Mortonの指示を受けたW.S.BoyleとG.E.Smithによる1時間あまりのディスカッションの中で、CCDの基本構造が発明された。そして1969年10月、およそ1週間でマスク、素子の試作、実験までが行われた。

翌年3月、ニューヨークで行われたIEEEコンベンションにおけるパネルディスカッションの席上、わずか5分足らずの時間の中でBoyleによりCCDの基本原理が初めて紹介されると、その翌月にBoyleとSmithによって、ベル研の機関誌『Bell System Technical Journal』の中で、「シリコンに光を当てると画像が出る」というCCDの基本原理と8ビットのシフトレジスタ（電荷転送を行なう回路）について書いた最初の論文<sup>5</sup>が発表された。

図1. CCDによる撮像の仕組み

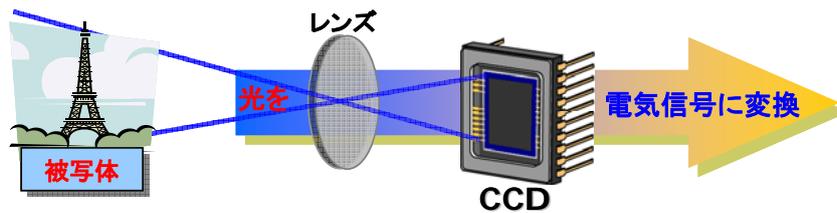
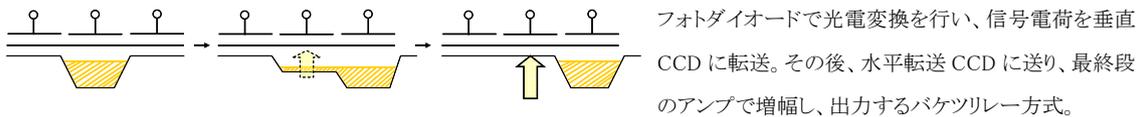


図2. CCDの信号電荷転送方式



### CCD の優位性

CCD の優位性は、図2に示すようなバケツリレー式の電荷の転送によって順次読み出しを実行し、その電荷数を殆ど失うことなく「完全転送」を行なうことができる点にある。各々の電位の層の深さにはばらつきがあるが、電荷数を維持できれば最終段のアンプでは同じ条件で出力されるため、FPN (Fixed Pattern Noise;固定パターンノイズ) が原理的にないといわれている。また、CMOS イメージセンサ (後述) では各画素のフォトダイオードごとにアンプ (増幅回路) を置いているのに対して、CCD では画素ごとにアンプを持たず、各画素の信号を順次隣に伝送していき、最後にアンプで増幅する。そのため CCD ではアンプが少ない分だけ光を受ける開口部の面積を広くとることができ、高感度かつ低ノイズとなる。

### CCD の弱点

CCDの弱点としては、専用プロセスが必要となるため、製造工程が複雑であり、周辺回路内蔵が困難である (つまり、構造上1チップにまとめることができない) 点、また、複数の駆動電源が必要になるため消費電力が大きい点、そして電荷をバケツリレー方式で送る構造上、転送速度が遅く (高速化が困難)、画質劣化要因の1つである「スミア」が起きやすい点などが挙げられる。

### 帰ってきた「神様」 ～君たちも CCD をやっているのか?～

岩間和夫 (1919～1982。ソニー株式会社第4代社長) はベル研で既に CCD を見ていた。SOBAX の失敗等によって創業以来の危機に直面していた 1973 年 6 月、岩間(当時 54 歳) は社長として赴任していた Sony of America からソニー本社に副社長兼中央研究所長として帰任。まだ論文発表前であった 1969 年末にベル研を訪れた際、岩間は Boyle と Smith に直接面会して CCD の研究に触れ、即座にその革新性を見抜いていた。そして中研に訪れ、越智らによる 8×8 画素の「S」の字の CCD 撮影画像デモを見ると、岩間はこの試作された CCD に非常に強い関心を示し、こうつぶやいた。「君たちも CCD をやっているのか。」

その 5 ヶ月後の 1973 年 11 月に、岩間は CCD を中研の主要研究テーマとして決定、自らの直轄プロジェクトとして発足させた。

岩間はソニーにおけるトランジスタの礎を築いた男である。即ちそれは、「日本における半導体産業の基盤を創った男」と換言できる。1954年、岩間はAT&Tの製造事業会社であったWestern Electric(WE)社からのトランジスタ製造ライセンス取得に際して、米国に渡る<sup>7</sup>。この時、WE社のトランジスタ製造工程の視察を重ねた。写真はおろか、あらゆる記録行為が許されない厳重な警戒態勢の中、自らの目や耳で得たあらゆる情報を必死で頭に叩き込み、戻ったホテルで記憶を辿りながら起こしたメモを毎日少しずつ日本に送った。後に「岩間レポート」と呼ばれることになるそのメモは、日本で準備していたソニーの製造部隊がトランジスタの製造を初めて成功させるための唯一にして最高のレシピとなった。WE社からは、「トランジスタラジオなど出来るはずがないから、補聴器を作ってはどうか。」と助言を受けたが、ソニーは見事にトランジスタラジオ“TR-55”を商品化し、世界中を驚かせた。半導体を民生商品向けに本格的に搭載したのはこれが初めてであり、今日の半導体産業ならびにエレクトロニクス産業を開花させるトリガーとなる画期的な商品だった。

岩間は寡黙な男であった。岩間以前の井深大や盛田昭夫が、そして岩間以後の大賀典雄、出井伸之というソニーの歴代トップは社内外に向かって非常に積極的に情報を発信してきたが、岩間のスタイルは彼らと一線を画していた。だが普段寡黙なだけに、いざ岩間の発する一言は、強烈なインパクトと影響力を持っていた。

研究者・エンジニアから見た、帰任当時の岩間の存在について尋ねると越智は迷うことなく答えた。

「“神様”ですよ。バイポーラ・トランジスタを大成功させたということで、既にもう神様だったんです。たった2年ですよ。当然、半導体の製造装置など無い状態から、製造装置を作ってトランジスタとラジオの開発をしながら、2年で商品化に成功したわけですよ。例えば東芝でさえもこれに追いつくには更に2年かかりました。これは今考えても驚異的なことです。その後、1973年にアメリカから日本に帰ってきました。この間は、もう20年近く期間が経っているのですが、やっぱり神様として帰ってきました。殆ど何も言わない神様なのですがね。」

岩間が「神様」と呼ばれた所以は、その類まれなる「技術の目利き」に関する能力によるものだった。その事実を裏付けるエピソードがある。当時中央研究所長だった岩間は、研究所における研究内容を詳細に検討した結果、今後のソニーの手がけるべき技術として、5つの主要研究テーマを1973年までに策定した。その5つのテーマとは、①磁気記録用材料／デバイス及び記録技術、②化合物半導体技術、③衛星放送用デバイス及び材料技術、④デジタル信号処理技術、そして⑤CCDであった。これは結果的にソニーが90年代までに研究開発し、消費者に対して新たなライフスタイルの提案を行なってきた商品、つまりソニーをソニーたらしめてきた商品は全てこの岩間の描いた未来図の中にあっただことからも、彼の技術に対する先見性は極めて秀逸であったことがわかる。岩間の指示により、1975年から1978年までソニーにおけるCCD開発のプロジェクト・マネージャーを務めた川名喜之<sup>8</sup>はこの時の状況を語った。

「その重点項目はどうやって決めたのかと言うと、岩間さんは研究所だからといって皆が好き勝手にテーマを決めて研究をやっているのでは駄目だ、重点項目を決めて将来のソニーにとって役に立つテーマを選び出したいという方針を打ち出した。これが岩間さんと高崎さん<sup>9</sup>が行なった研究所改革の骨子だったと思います。重点テーマを決めるに当たって、どうしたらよいのか、それはやっぱり二人だけでは決められないから、研究所の各室長な

ど主要なメンバーを一人ずつ呼んで、『今お前たちは何の研究をしているのか？研究状況は？』ということを知って回ったんですね。もちろん岩間さんはアメリカにいたこともあって研究開発の最新動向も知っていましたから、ソニーの将来のためにはこの研究が必要だということを、ヒアリングをしながら自分で考えて最終的に決定したのが重点研究テーマ5項目だったんです。」

CCD を中研の主要テーマとして取り上げるに当たって、岩間の中研の応接室で、次期研究所長となった菊池に対して2つの経緯を述べている。

第一は、フィルムレスカメラへのチャレンジだった。岩間は1970年初頭に、まだ原理が提唱されただけで、使い物になるかどうか分からない CCD に対して、全電子式カメラ、すなわち現在のデジタルカメラの可能性を確信し、自身の直轄プロジェクトに設定したのである。

第二は、社内の事情によるものであった。それは岩間の語った次の一言に全てが集約される。「CCD がただやりたいからやるのではない。ソニーの半導体を生き返らせるんだ。難しいからやろう。」

米国から帰ってきた岩間が見た日本の半導体業界は既に MOS の天下であり、MOS の波に完全に乗り遅れたソニーの半導体事業は瀕死の状態だった。ソニーが MOS に乗り遅れたのは、バイポーラが圧倒的に強かったからであった。何故か。ソニーが日本のバイポーラ半導体を立ち上げたことに加え、バイポーラ・トランジスタは、ラジオや TV、ビデオなど創業以来ソニーが最も得意としてきたコンシューマー商品と強く結びついていたからである。バイポーラ・トランジスタの開発に注力し、それが搭載された商品が飛ぶように売れた。故に半導体部門のみならず、幹部を含めたソニー社員の大部分は、ソニーの半導体事業はこれで良いと考えていた。しかしこれからは MOS の時代になることを見通していた者も一部おり、その中でも最も良く状況を理解し、危惧していたのはソニーの半導体事業を創った岩間だった。ところが岩間自身は Sony of America の社長になったこともあり、半導体事業から離れていたために自らそれを伝えられず、何とかしなければならないと考え続けてきたのであった。

また、バイポーラ・トランジスタから始まったソニーにおける半導体開発のスタンスは、社内の製品に組み込むことを前提として開発されたものであり、それまで外販は殆ど行っていなかった。その状況下において、半導体の集積化が進み、回路技術やプロセス技術の高度化が急速に進むと、社内需要を満たすことだけを考慮して「内向き」の開発が行われている傾向が強いことに危機感を覚えた。だが当時、まだ外販断行の方針転換を取るには時期尚早と判断した岩間は半導体研究者のレベルアップの手段として、難易度が高く、研究者魂を刺激するようなチャレンジの機会を作ることが不可欠と考え、ソニーの半導体再生の起爆剤として、技術者・研究者のモチベーション鼓舞のため、高度な技術を必要とする CCD を選択したのであった。

そして岩間は越智らプロジェクトメンバーを集めて、「5万円以内の CCD カメラを5年以内に商品化せよ。我々のライバルは（イメージセンサの研究開発をしている競合のエレクトロニクスメーカーではなく、フィルムメーカーの）イーストマン・コダックだ。」と明言するなど、極めて明確なトップダウンのゴール設定を行った。

## 二つの闘い

しかし岩間の期待に反して CCD の研究開発は当初から困難を極め、難航した。最初の成果として 8×8 (64 画素) の「S」の画を出した越智らだったが、研究に着手した当初から、何度試しても「白キズ」や「白ボケ」などキズだらけの画像を出力し続け、まともな画が出てこなかったため、CCD の技術的なハードルがとてつもなく高いことに気づき、少なくとも 10 年はかかる長期のアングラ研究生活となるであろうことを覚悟する。

CCD を発明したベル研は当初、「CCD はたった 4 枚のマスク<sup>10</sup>で出来る。こんな簡単な半導体は無い。」と公言していた。しかし 2007 年現在量産されている一般的な CCD はおよそ 40 枚のマスクを使っており、ベル研が当初考えていたレベルの約 10 倍の複雑なプロセスが必要となっている。だが当初の CCD に対する認識はその程度であったため、この画期的な半導体デバイスの可能性に各社が熱狂し、ソニー以外の競合メーカーもこぞって開発競争に参入した。しかし、いざ開発に着手すると満足できる画質の CCD はいっこうに出来ない。CCD のイノベーションは二つの闘いの歴史であった。

まず一つ目は撮像デバイスとしての基本的な性能である解像度や感度を高めていくための研究開発、すなわち「ノイズ (雑音)<sup>11</sup>との闘い」である。10 年以上に渡るデスバレーの中で最も大きな技術的な困難は何だったのか。この質問をぶつけると、越智は即答した。

「やはり一番難しかったところは、S/N 比 (Signal to Noise Ratio)、単位面積あたりの感度です。単位面積あたりの感度が高いということはノイズを徹底的に下げなければならない。つまり一番の成功の要因は、ノイズとの闘いに勝ったということだと思います。ソニーは 1978 年に世界一のレベルの CCD を出しました。学会発表では世界一でしたが、その前に RCA は FT 方式の CCD カメラを展示会で出展したんですね。この時、実際に計ったわけではないですが、見学した時の感覚では大体 2～3 万ルクスの照明を当てていた。そのレベルになると網膜が焼けてしまうので、見学者は光を遮る ND フィルタを施したガラス越しに見なければならないようなものだったのです。しかし現在の CCD なら、数ルクスでそのレベルの絵は出せます。ということはつまり、当時から 1 万倍程度の S/N の改善があったわけです。もちろん、その改善というのは光の量が増えたわけではなく、画素は段々小さくなってきていますから、S/N の「N」が 1 万分の 1 以下に下げられたということです。繰り返しますが、やはり CCD との闘いはノイズとの闘いでした。」

## キズとの闘い

もう一つの闘い。途方もなく長い苦難の道のりは、「画像欠陥」、すなわち「キズとの闘い」を中心に続いた。人間の眼は非常に感度が良く、わずかなキズですら明確に視認する。キズを発生させ、画像欠陥を引き起こす要因は、フォトリソグラフィー及びエッチングに関する断線、ショート、酸化膜界面のトラップ及び局所的欠陥、ブルーミング<sup>12</sup>、CCD の動作に不可欠な特性の一つである結晶表面近傍の少数キャリアのライフタイムの問題、白キズを引き起こす結晶欠陥等が挙げられる。

加えて、CCD のようなアナログ要素の強い半導体は、キャパシタにためた電荷がどれだけ貯まったかという連続的な変化が鍵になるため、CCD 製造工程においてニッケルやクロムなどが引き起こす重金属汚染や微小なダスト等も画像欠陥を誘発する。これらがほんの少しでも存在すると、その部分が画像の白キズや黒点として顕著に映ってしまう。重金属

汚染やダストを防止する為には、製造工程全体を極めてクリーンな状態にしなければならず、CCDの製造プロセスに求められるクリーン度は他の半導体の比ではなかった。

画像欠陥を引き起こすこれらの諸要因は、後に段階的に解明されることになるが、この時点では何が真因で、どこを改善すれば良いのかすら殆ど何も分からない。それはソニーのみならず、鎬を削っていた競合他社においても同様だった。

中研所長菊池が当時フェアチャイルド・セミコンダクターでCCDの開発を指揮していた友人のトム・ロンゴを訪れた際、彼の部下で実際にCCD開発に携わっていたマネージャーは、自社におけるCCDの開発について、「キズは宿命적이다。このキズを減らすことは人間には不可能だ。CCDの限界はここにある。キズをなくすことは神以外には出来ない。」と話していたほどである。

### “Dig into the Science”

画質低下の原因であるノイズやキズの原因を突き詰める探求と、それらを根絶する試み。全く未知の半導体デバイスであるCCDを自在に操るためには、科学知への回帰によってしか先に進むことが出来なかったのである。川名は当時を振り返る。

「デバイス研究において欠かせない視点は材料・物性です。例えばこのデバイスを作るために必要な材料はどのような材料でなければならないのか、何故こんな現象が起こるのだろうかということ突き詰めていく研究、これが重要だと思います。それはどこから情報が入ってこない分野であり、だからこそ研究する価値があるわけです。ある時菊池さんが、この問題を解決しなければCCDはものにならないという状況下で、材料研究の話に関して言ったもので、“Dig into the Science”という言葉があります。それが私達の合言葉でした。これこそが基礎研究なんですよね。そういうサイエンスが、本当に新しいデバイスなり商品を作り出す源になるのだと思います。」

例を挙げよう。CCDプロジェクトが発足した1973年から3年ほど経過した1976年頃になっても、依然として出力した画像には無数のキズや点が映り続け、川名率いるメンバーは、「画像欠陥」という高い壁にぶつかっていた。画像欠陥というのは、症状も原因も千差万別であり、この点を一つ調べて解決すればそれで済むということではなく、複雑に絡み合った複合的要因が重なって欠陥が起こる。その中でも最大の課題は「結晶欠陥」であった。当時、ソニー中研には回路やカメラシステムのチームのみならず、シリコンの結晶欠陥を研究するチームがあり、岩間の指示によりCCDの画像欠陥と結晶欠陥の関連を探る研究を行っていた。結晶欠陥についてもその症状は多様で、挙動も多岐に渡っており、設計時が原因となる欠陥もあれば、熱処理などの製造工程で結晶が変化していくために起こる欠陥もある。中研では物質の原点に戻り、「結晶欠陥とはそもそも何なのか、またどのような挙動をするのか」を徹底的に研究した。すると、ある時彼らはCCDの動作に不可欠な特性の一つである結晶内の少数キャリアのライフタイムが極めて悪いことに気が付く。度重なる仮説立案と検証の末に、その原因は結晶内の析出物、特に銅やニッケルなどの重金属原子が結晶欠陥を誘発し、最終的な結果としてCCDの画像欠陥を引き起こしているという仮説に辿り着き、それをEBIC法（Electron Beam Induced Current；電子線励起電流）によって確認した<sup>13</sup>。

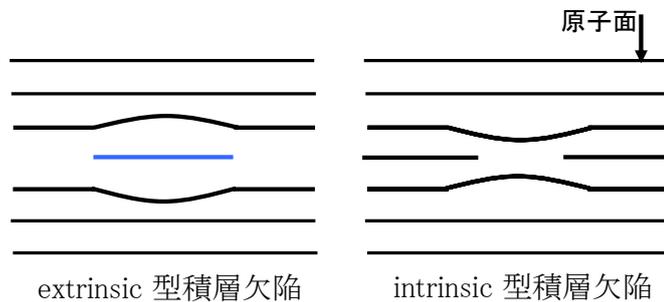
しかし原因は分かっても、何故、どのような原理でこの重金属汚染が起きるのか、そしてどうすればキズを消せるのかは分からない。この問いの答えを見出すため、ソニーのCCD

プロジェクトは材料研究に立ち返る。

暫くすると、シリコン結晶の表面に薄い酸化膜 (SiO<sub>2</sub>) を作る製造プロセスは、温度を上げて結晶表面を酸素に触れさせて酸化させるが、この時結晶内の原子の配列に局所的乱雑性が発生することが分かってきた。(そうした研究はベル研で既に行われていたが、その現象がはっきりと捉えられるようになってきた。) 図3で示したように、結晶中の原子が並んでいる面 (原子面) が周期的に積み重なって完全結晶が形成されている時、原子面の欠落や余分な原子面の挿入によって原子面の周期性に狂いが生じる欠陥を“スタッキング・フォールト (Stacking Fault ; 積層欠陥)”<sup>14</sup>と呼ぶ。このスタッキング・フォールトが酸化膜を張るプロセスの途中で生じやすいのである。しかし、スタッキング・フォールトそのものが結晶に悪さをするわけではない。問題は、スタッキング・フォールトが生じている箇所に重金属原子が付着すると、その「結合状態」が電子の移動にとって極めて不都合になるのだ。

イレブンナイン<sup>15</sup>と呼ばれるほど高純度が求められるシリコン結晶は、最新のクリーンルームを使っても微量の重金属を除去することが難しい。そして、わずかな温度上昇ですら金属原子は結晶表面近傍から中に入り込んでしまい、こうした金属原子は温められた結晶中では非常に活発に動き回る。つまり例えるならば、結晶中で蠅のような重金属原子が飛び回り、スタッキング・フォールトにたかる。その結合状態がCCDが出力した画像にキズを作り出す原因であることを突き止めたのである。

図3. スタッキング・フォールト (積層欠陥)



キズを引き起こす蠅の存在が見えた。さすれば次は蠅を如何に除去するかである。重金属不純物を除去する技術はゲッターリング(gettering)<sup>16</sup>と呼ばれ、ベル研等で研究が行われていたが、ソニーのCCDプロジェクトは試行錯誤の末に、「裏面リン拡散」という独自の方法で蠅の除去を行った。先に述べたように、スタッキング・フォールトには蠅がたかる、すなわち重金属をトラップする性質を持つことが分かっていたため、逆にこの性質を積極的に利用して不純物を捕獲し、素子領域をクリーンにする技術である。1100℃の高温でシリコンウェハの背面に長時間のリン拡散を行った結果、驚くべきことに重金属不純物が激減しただけでなく、結晶欠陥も大幅に減少したのである。

そしてこうした一連の結晶研究は、白点の原因となっていたシリコンの結晶欠陥の問題をクリアするための「MCZ法 (Magnetic Field Applied CZ) : 磁場応用結晶引き上げ法」という画期的な結晶成長法の発明へと繋がり、CCDにとって不可欠な条件である良質の結晶製造を成し遂げるイノベーションに帰結した。何故 CCD で撮った画像に無数のキズが出

てくるのか。原因を根源まで突き詰めた末に回帰した材料科学から獲得した知恵だった。

### イノベーションの分岐点 ～FT-CCD か IT-CCD か～

以下の表1は、1970年から1985年までに実現したCCD(素子)の主要な技術を纏めたものである。これを見ると、ソニーがイメージセンサの発展に対して多大な貢献をしてきた事実を窺い知ることができる。このように幾多の画期的な技術革新を生み出してきたソニーのCCDプロジェクトであったが、比較的初期の段階にあった1975年に、後にソニーがイメージング産業のトップランナーとして君臨するに至る布石となった意思決定があった。それは、電荷転送方式の選択であった。

表1. CCD(素子)の主要な技術革新(1970～1985)

	年	名称	発明/出願者	概要
回路・構造技術	1970	CCDの基本原理解説	ベル研 Boyle, Smith	発明は1969年
	1971	Frame Transfer(FT)方式-CCD	ベル研 Tompsett, ハートム	最初に提案された電荷転送方式
		Floating Diffusion(FD)アンプ	RCA W.F.Kosonocky, J.E.Carnes	感度を向上させる電荷検出技術
	1972	ブルミグ抑制CCD	ベル研	淡く白いボケとして画像に表れるブルミグを抑制する技術
		Interline Transfer(IT)方式-CCD	RCA W.F.Kosonocky, J.E.Carnes	現在デファクト・スタンダードとなっている電荷転送方式
	1974	相関二重サンプリング(CDS: Correlated Double Sampling)回路	Westinghouse Electric M.H.White, Lampe, Blaha, Mack	回路信号をサンプリングする方法の一種で、センサ信号のノイズを抑圧する技術
	1975-1976	市松画素配列	ソニー 越智、山中、狩野、西村	高解像度化、高感度化のための画素配列パターン
	1975-1976	ドリフト電界加速	ソニー 越智、山中、狩野、西村	
	1976	フィールド読み出し(フィールド蓄積)	ソニー 越智	等価残像を失くし、動解像度、S/N比向上に貢献。TVインターレース走査方式に対応
		ペイヤ配列カラーフィルタ	EASTMAN KODAK	フィルタ処理によるRGBカラー画像構築手法
	1977	可変電子シャッター	ソニー 越智、橋本、萩原	水平帰線期間に不要電荷を捨てる高感度化技術
		空間画素ずらし	ソニー 越智	例えば3チャップの画素を重ね合わせる際に1/3間隔だけ空間的にずらして解像度を上げる画質改善技術
	1979	Frame Interline Transfer(FIT)方式-CCD	ソニー 越智	スミアやフリッカ等の画質問題を解決できる基本的な手段となった方式で、放送局用など最高機種に採用されている
	1981	埋め込みフォトダイオード	NEC 寺西	画像のノイズ低減技術
1982	垂直オーバーフローライン(VOD)構造フォトダイオード	NEC 石原	ブルミグ除去、画素サイズの小型化や電子シャッターの実現	
プロセス	1975	Extrinsic Gettering	ソニー 川戸、早藤、安達	裏面リソグラフィーにより金属原子をCCDから取り去る技術
	1979	MCZ法(Magnetic Field Applied CZ) :磁場応用結晶引き上げ法	ソニー 鈴木	シリコン結晶欠陥の解決による白キズ撲滅
		CCDパターンのウエハ上での欠陥検査機 (装置開発)	ソニー 加藤	ウエハパターンのフォトリソの欠陥場所を検査する自動機。現在の各種ウエハ上の欠陥検査機の前駆

(各種論文より筆者作成)

### CCDの電荷転送方式について

まずそれぞれの電荷転送方式について見てみよう。CCDには、主に以下の2つの転送方式がある<sup>17)</sup>。

#### FT方式

CCD発展の歴史の中で最初に提唱されたのがFT方式であり、この方式は撮像領域と同程度の面積を持つ蓄積領域および水平CCDと電荷検出部によって構成されている。電荷を転送するシフトレジスタ部がそのまま画素としても働き、受光部(撮像領域)は光電変換、電荷の蓄積、転送の3つの動作を兼ね備える垂直CCDのみで構成されており、縦方向に垂直CCD、横方向に水平転送電極が配置されている単純な構造である。

FT方式は図4で示すように、受光部のフォトダイオードの面積を大きく取れるため、開口率が高いという利点があるものの、転送電極が撮像領域全面を覆っているために光を吸

収してしまい、感度低下の原因となるという構造上の欠陥を持っている。そして撮像領域の各画素で光電変換した電荷は、映像信号のブランキング期間に、全ての画素について蓄積部まで転送（フレーム転送）が行なわれるが、この際にも撮像領域の垂直 CCD では光電変換が常に行なわれているので、撮像領域の電荷はなるべく早く蓄積領域に転送してしまわないと転送中の信号電荷に余分な光電変換の信号が加わることになる。特に強い光が当たっている部分を通ると、スミアが起こる。スミアはフレーム転送速度に反比例して減少するが、転送速度には限界があるため FT 方式では避けられないノイズとなる。FT 方式はこれら多くの欠点を抱えており、実用化されている DSC や DVC には殆ど採用されていない。

## IT 方式

DSCやDVCなど、民生用のカメラに最も多く採用されている方式がIT方式（Interline Transfer ; IT）<sup>18</sup>で、画質面、サイズ、利便性などの観点から最もバランスが取れており、現在でもCCDのデファクト・スタンダードとなっている。

図5に示す通り、IT方式はFT方式のようなストレージ部がなく、受光部と垂直転送 CCD が分離している。複雑な構造になっているものの、フォトダイオードで光電変換と電荷の蓄積を担い、垂直 CCD で電荷転送を行なうという明確な役割分担が可能になるため、それぞれの特性の向上に専念することができるという利点がある。また、ストレージ部が無いためチップの大部分を撮像領域で占めることができ、イメージセンサの小型化にとって有利となる。

図4. FT方式CCDの構造

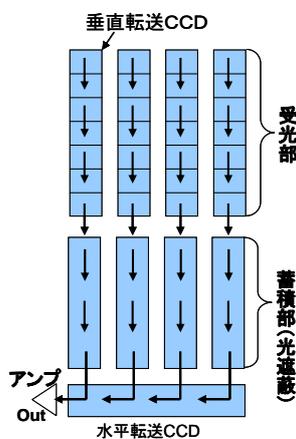
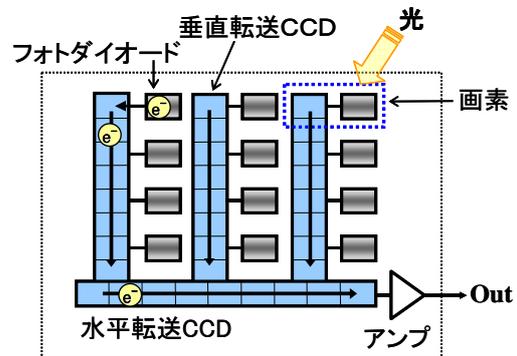


図5. IT方式CCDの構造



## 自ら選び取った困難の道

FT方式か、はたまた IT方式か。CCDがMOS型イメージセンサ（後述）を駆逐し、CCDの画質向上競争および小型化競争においてソニーが他社の追随を許さないリードを広げていく契機の一つとなった、この重要なイノベーションの分岐点における意思決定の場面において、岐路に立たされたソニーのCCDプロジェクトは悩んだ。両方式夫々を主張するグループがあったからである。FT方式は構造が単純だが、ストレージ部を設けることでチップサイズが増大する。また、ストレージ部はCCD転送ラインも兼ねているため、ストレージ部への転送が高速でないと解像度が低下する。IT方式の性質はFT方式の対極にあるため、画質向上には最適であるが、構造が複雑であり、チップサイズが小さくなる分、高度

な微細加工が要求される。早く試作チップおよびカメラを作って目に見える成果を出すためには FT 方式が望ましい。しかし、長期的なスパンに立って考えれば高画質の達成が期待できる IT 方式にすべきであろう。

結局、当初は 1975 年 3 月から FT 方式と IT 方式についてそれぞれ 2 種類並行して開発を進めていた。これは、FT 方式は早期プロセス確立のため、そして IT 方式を「本命」にしようとしたためであった。しかし、翌年からは「本命」にリソースを結集しようという判断を即座に下した。構造が複雑な IT 方式は、困難な技術開発となることが容易に予想されたが、それが正しい意思決定であったことはその後長く IT 方式が CCD のデファクトになったことからわかる。

自身が CCD 開発のプロジェクト・マネージャーとなった当時（1975 年 3 月 24 日）の川名の報告書には一年間の開発計画の概要が書かれており、この点について触れられている。

1. 微細構造、大面積の CCD 完成を目指し、欠陥フリーにする為の各プロセスの基本条件を固める。
2. 前述のプロセス条件に基づき、FT 方式のプロセスを固め、3 チップ方式の CCD カメラの最終設計ができる条件を整える。
3. IT 方式は、1 チップ CCD カメラの本命と考え、その構造、プロセスを決定できるようにする。

こうしてソニーの CCD プロジェクトは、IT 方式一本にターゲットを絞り、将来の 1 チップ化を見据えた 3 チップ方式と 2 チップ方式のカラーカメラの試作開発を進めていった。

### 月に一度の中研訪問

中研所長を後任の菊池に引き継ぎ、社長に就任した後も、最低でも月に 1 度は必ず現場に足を運んで進捗を確認し、プロジェクトに強くコミットし続けた。越智は振り返る。

「岩間さんは、1 ヶ月に 1 度は我々のところに訪問されていましたが、その間に、PERT (パート) 図、いわば開発のスケジュール表ですが、この PERT 図を私が書いて、中研にいらっしやらない間はそれで岩間さんとやり取りをしていました。」

川名も毎月の岩間の訪問を、「月一の中研訪問」と呼び、次のように言った。

「社長とは言えど、岩間さんに情報を伝えるというのは比較的簡単だったように思います。それはやはり、岩間さんが毎月一回来られるから、その際に、そのひと月分の進捗状況、具体的に何を行なってどのような結果が出たのかということまで、詳細な報告会をやっていたのです。報告をすると、物理出身の岩間さんらしく、出現現象の因果関係についての質問が出るんです。例えば、『白キズ等の画像欠陥が現れ、このような画が出ました。』という報告内容だと、『この結果は一体何なんだ？何故このような画像が出るのか？物理的にどういう原理でそれが発生し、それを改善するためにはどんな対処が必要になるのか？』ということを論理立てて説明するように質問が出ます。しかし、今ならば多少説明できることでも、当時は分からないことが多かったんです。部下のプロジェクトメンバーも皆、その報告会に出ていましたから、岩間さんが一体どういった発言をして、具体的に何に関心を持ったのか、それに対して私がどう答えたのかといったことを皆わかって、共有できていました。もちろん岩間社長も、報告会によって現場の状況を共有できていました。」

## 社内から巻き起こるプロジェクトへの逆風

越智が初めて出した「S」の画像は 64 画素であったが、画素数向上については、越智らの奮闘により徐々にではあるが、だが着実に道筋を付けていき、2千、8千、7万、そして1978年には12万画素に到達した。

しかし感度が思ったように上がらず、ノイズやキズについても完全に根絶やしにすることが出来ず、満足のいく画質は得られていなかったこともあって、1977年に学会発表を行った後も、ソニー社内の CCD プロジェクトに対する目は依然厳しかった。いつまでたっても商品化できずにビジネスになるかどうかわからない技術に対して、他の技術開発プロジェクトに影響を与えるほど莫大な研究開発投資が注ぎ込まれていたからである。川名は当時の状況を語ってくれた。

「1977年頃、新体制発足後1-2年やった時点で、これはものにならない、将来性がない上に、金ばかりどんどん使っているような研究は早くやめたほうが良いと皆が言い出したんですね。ある部長などは、『CCDは今、Fever(熱病)の中にある。そのうち収まるだろう。』とまで言いました。しかし岩間さんは、良い装置を買えば改善するのではないかと言い、装置の購入を積極的に薦めてくれたんです。そして、岩間さんは CCD にとって結晶成長技術が重要になることを理解していましたから、今でこそ一般的になりつつありますが、M&A など考えられない当時において、『必要ならば結晶メーカーを買え。』と、結晶メーカーの買収も提案してくれました。当時でも、私はマネージャーとして自分の部署だけお金を使いすぎるのは申し訳ないと思ったので多少抑える努力はしたのですが、それでもかかるお金は増えてきて、全社の研究開発を統括管理する研究開発企画部門が、商品化時期と予想売上げをベースにした投資計算をはじき出し、こんなプロジェクトは早くやめさせなければならないと言いだした。そうした社内からのプロジェクト中止の圧力は強まっていき、そうした声は他部署の部長のみならず、他本部の取締役などのトップマネジメントへと広がっていったんです。そこまでいけば普通だったら潰されてしまうはずなんですが、潰されなかったのは岩間さんが『うん』と言わなかったからなのです。」

またその頃、中研や CCD 開発担当者の中からも、『CCDは世襲で開発するものである。』という皮肉の声が広がっていた。1978年に12万画素 CCD の試験量産準備段階に入った時までにこのプロジェクトに投入された資金は、当時の金額で200億円というとてもない金額だった。

だが、こうした社内の批判を岩間は静かに牽制し続けた。「CCDがものになるのは21世紀。利益が上がるのは自分たちがいなくなってからだ。」副社長から社長に昇進していた岩間が、予算を管理する責任者であった大賀典雄(元ソニー社長)に語った言葉である。

トップ自身がリスクを負い、責任を取るという方針を明確にし、長期的な視座に立って自社にとって真に重要となる技術開発についての意思決定を行う姿勢を社内を示すことで、苦闘が続いていた研究開発現場との揺ぎ無い信頼関係を築いた。そしてこのようなトップの覚悟は、現場のモチベーションを向上させる強烈なメッセージとなった。

## 流れを変えた新聞発表

1977年の暮れになると、画像の端の部分に僅かに解像度が悪い箇所があったが、比較的画像欠陥が少なく、転送効率も改善され、「抜け」も良くなった画像が徐々に始まった。岩間は例の如く口数が少なかったが、報告を聞きながら技術的な質問をいくつか尋ねた。そ

して岩間は決心する。この時の岩間とのやりとりを川名は鮮明に記憶している。

「CCDの歩留まりは依然として悪かったですが、その当時としてはかなり立派な画が出るようになったんです。それで私が猫の写真を映したその画を岩間さんのところへ持っていったら、岩間さんはこの件でソニー中から色々と言われてきましたから、本当は大変喜んだはずなのですが、『とうとう出たか。』と、一言だけ言ったのを覚えています。彼はもうその次の作戦を考えていたんでしょうね。その後、1978年の2月に岩間さんが研究所に来ましてね、『よし、これで新聞発表をやれ。』と言ったので、その翌月の3月9日に新聞発表をやりました。」

このプレス発表は当時のソニーにおいて最大級の規模となった。冒頭に岩間は、1969年末に自らがベル研を訪れた際に出会った生まれたてのCCDに大きな衝撃を受けたことを語り、今後更にCCDは進化していくこと、CCDこそが次代の映像産業を牽引するキーデバイスとなっていくこと、そしてソニーこそがその担い手となっていくことを静かに、しかし自信に満ち溢れた声で述べた。12万画素CCDを搭載した3チップ型のCCDカラービデオカメラで映し出した画像をディスプレイに映し出したデモンストレーションを行なったこともあり、翌日の新聞各紙はこの記者発表の記事がトップ級で大きく報じられた。それまでソニーはCCDに関して、社外へのパブリ活動を極力控えていたので、この記者発表によってソニーのCCDは鮮烈なデビューを飾った。川名は語る。

「この記者発表が大変な騒ぎになったんです。日本中の新聞が全部書き立てて、海外でも発表したもので、世界的に大騒ぎになりました。これには3つのインパクトがありました。1つ目が、ソニーがこんなにも良い製品を作ったというソニーの評判を上げるインパクトで、2つ目が、NECも松下もCCDをある意味で諦めかけていたところに、ソニーが突然成果を上げたものだから、MOSの技術力に劣っていたソニーに負けるわけにはいかない、自分たちも頑張らなくてはといったように、開発競争に再び火を点けたということですね。そしてもう一つの大事な意味は、社内から早くCCDプロジェクトを潰せと言われて続けてきた状況の中で、日本だけでなく世界中のマスコミが書き立ててくれたから、これはひょっとしたらいけるかもしれないという声が一転して社内からも増えてきて、CCDプロジェクト、ひいては岩間さんに対する圧力が減ってきたという効果があったんです。もちろん、反対派の意見が急に変わったわけではありませんが、少なくとも、もしかしたら将来本当にCCDが出来るかもしれないと思わせることができました。新聞発表によって、CCDをソニーが商品化するんだということを世界中に発表したということでしたから、社内の反対も多少収まらざるを得なかったのでしょう。」

その後、岩間は間髪入れずに1978年5月の連休明けに中研を訪れ、所長室で菊池にこう伝えた。「このプロジェクトはもう中研でなくてもいい。今度は厚木（半導体工場）に移して生産の準備に取り掛かろう。そのための新しい製造ラインを作るように。」

「研究には寿命があり、研究所が持ちすぎると研究は必ず腐る。」という岩間自らの口癖を体現した意思決定であった。

### 全日空へのCCDカラーカメラ納入、そして“CCD-V8”の発売

厚木に移る前の1977年7月、越智の同期入社であった全日空担当営業の木田真人が、全日空から、「上空の飛行機の中から地上を撮影してその映像を乗客に見せるためにCCDをカ

メラに使いたい。」という要望を受け、越智らに相談を持ちかけたことで、航空機向けのCCDカメラの開発がスタートした。コックピットが小さいボーイング 747 に収まるサイズのカメラが要求されており、それまでの撮像管カメラではサイズが大きすぎたためであった<sup>19</sup>。また、コックピットのみならず車輪にもカメラを付けて、離着陸の映像を見せたいというニーズもあったため、サイズ面以外に振動や温度耐性等の点でも固体のCCDでなくてはならなかったのである。

当時、木田の上司であった常務の森園正彦<sup>20</sup>はこの経緯を早速岩間に報告すると、この話を聞いた岩間は、これこそが千載一遇のチャンスと見抜き、このターゲットに向けて積極的に推進していくよう、プロジェクトメンバーに指示を出した。当時のソニーのCCDはまだ民生用に搭載できるほど歩留まりも画質も上がっていなかったため、少量納入かつ民生品ほど高画質を要求されない全日空からのこの引合いの意味は大きかった。

航空機向けという特殊なニーズに対応するため、信頼性の確保に向けた開発に時間がかかったが、産業用とはいえ世界初のCCDカラーカメラ“XC-1”<sup>21</sup>が完成したのは1979年12月であり、翌1980年1月に記者発表を行った。この記者発表は、1978年に行なった3チップ型CCDカメラ以来となる大々的な発表であった。岩間は会見場で取材に訪れた記者達に、プロジェクトの中心メンバーだった越智らを紹介した。寡黙な岩間が部下の健闘を讃える珍しいシーンとなった。

その後、全日空へのCCDカメラ納入から一年が経過した1981年になると、岩間は鹿児島県にあるソニー国分工場に量産ラインを作るようにと指示を出す。その翌年の1982年、国分に世界初のCCD専用生産ラインが誕生した。5月には生産ラインが完成して稼動し始めたが、製造工程におけるダスト（CCD自身のダストに加え、ガラスレンズの蓋についてのダスト）や微量の重金属汚染の問題に手こずり、歩留まりが1%に満たない状況で四苦八苦したが、不良の原因を一つ一つ潰していった末にようやく歩留まりも上がり、本格的な量産立ち上げに目処がつき始めた頃、プロジェクトメンバー、そしてソニー全社に衝撃が走る。同年8月、岩間は在職（社長）のまま63歳の若さでこの世を去る。腸癌だった。晩年、病に倒れ入院した岩間は病床でも、「必ず国分のCCD工場を見に行く。」と言い続けていたが、量産化を見届けることはできなかった。

しかし岩間亡き後、プロジェクトメンバーのみならずソニー社内には、ここまで岩間が引っ張ってきたCCDを何とかものにしたい、せねばならないという執念に似た共鳴心が渦巻き、その後も生産トラブル等が相次いだ。その執念とメンバーの奮起はついに岩間の悲願であった家庭用CCDビデオカメラへと結実する。1985年1月、25万画素の高解像度CCDを搭載した初めての家庭用CCDビデオカメラ“CCD-V8”が発売された。“CCD-V8”は、年間15万台、派生モデルを含めると通算76万台を売り上げた大ヒット商品となった。

イメージング産業を創り出した岩間の墓石の後部には、後を引き継いでCCDの量産化・事業化を担当した大賀の手によって、最初の量産品のCCDが貼り付けられた。

## 2. 競争環境

### 当時の半導体メーカー各社事業規模

現在でこそソニーの半導体事業は 5000 億円近いビジネス規模になっており、少なくとも国内では大手に数えられるが、越智が CCD の研究を開始した 1970 年代初頭から、真の意味での実用化にこぎつけることができた 1985 年までの期間、当時の事業規模（生産規模）を比較すると、NEC、日立製作所、東芝が第一グループ、三菱電機、富士通が第 2 グループ、松下電器産業、三洋電機、沖電気、シャープ等が第 3 グループであり、ソニーはその次の集団に位置していた(ソニーグループ全社で見ても 1970 年で 149,173 百万円、1980 年で 905,150 百万円、1985 年で 1,448,290 百万円の売上高)。

かつてトランジスタラジオを世に出した 1950 年代には、ソニーは世界一の半導体企業と自他共に認めており、当時の研究開発の陣頭指揮を執っていたのは岩間であった。彼の下で江崎玲於奈がノーベル賞の対象となった「エサキダイオード」を開発し、トランジスタテレビも開花した。だが、その後渡米していた岩間が帰国して目の当たりにしたのは、熾烈な競争により、電卓用の MOS 半導体開発から撤退し、完全に生気を失ったソニーの半導体部門であった。また国内のみならず、海外でも Fairchild や IBM、Texas Instruments、RCA など、半導体大手の競合がひしめいていたイメージセンサの開発競争において、何故明らかに事業規模に劣っていたソニーがこのイノベーションの担い手となり、そして産業レベルに押し上げ、マーケットの覇者となり得たのだろうか。そのヒントの一端を探る為に、当時のソニーにおける CCD にとって最大のコンペティターであった日立製作所におけるイメージセンサの研究開発事例を見てみたい。

### 競合他社における当時のイメージセンサ開発状況

#### 2. 1 日立製作所による MOS 型イメージセンサの開発

ベル研のBoyleとSmithによってCCDの基本構造が発明された1969年から遡ること2年前<sup>22</sup>の1967年、初代の固体撮像素子として、FairchildのWecklerらによってMOS型イメージセンサの発表が行われた<sup>23</sup>。CCDがメモリへの応用を出発点としていたのとは好対照で、MOS型イメージセンサは最初から撮像デバイスとして開発された。

CCDが本格的に実用化する以前の1980年代半ば頃までは、CCDよりも日立製作所によるMOS型イメージセンサの開発が先行しており、実際に世界で最初の固体撮像素子を1978年に製品化したのは日立であった。そしてイメージセンサのみならず、アプリケーションであるビデオカメラという点においても、固体素子をイメージセンサとした最初の家庭用ビデオカメラは、CCDではなくMOS型イメージセンサの方が先に商品化された(1981年<sup>24</sup>)。

当時、研究着手から開発責任者、プロジェクト・マネージャーを務め、日立製作所におけるMOS型イメージセンサ開発のキーマンであった久保征治はインタビューの中で、同社における当時のイメージセンサ開発について語った。以下、その経緯をまとめていく。

小樽で生まれ育ち、1962年に日立製作所に入社した久保は中研に配属され、半導体の研究開発に従事することになり、ここから久保の研究生活がスタートした。かの有名な「ム

一アの法則」が生まれる3年前のことであった。

1970年、当時の上司の薦めもあり、久保はスタンフォード大学に修士課程学生として1年間の留学をすることになった。久保がスタンフォードに留学した1970年代初頭は、丁度米国において、後の半導体産業発展のドライバーとなる複数の重要な技術革新が生まれた時期となる。久保は言う。

「1971年は、CCDとDRAMとMPUという、半導体の3大イノベーションが出揃った年でした。一つはベル研でCCDイメージセンサが発明された。そしてIBMのレナルドという研究者によってDRAMのコンセプトが出来て、ISSCCで初めてプレゼンテーションしたのが1971年。そしてビジコンの嶋(正利)さんがIntelに技術協力して、Intelが世界初のマイクロプロセッサ4004(MCS-4)を発表したのが1971年の11月でした。」

その歴史的な時期に、シリコンバレー発祥の地であるスタンフォード大学に留学していた久保は、居ても立ってもいられなくなり、授業を抜け出して一週間ほどフィラデルフィアで開催されていたISSCCに飛んだ。その際にベル研も訪問し、CCDの研究をしている現場を見て回った久保だったが、この時に彼がイメージセンサの世界に入るきっかけとなる出来事があった。久保は回想する。

「その時ベル研を訪れると、CCDを発明したBoyleとSmith、そしてTompsettが、『これは今度学会で発表するんだけど、あなたに特別に見せてあげるよ(：まだ学会に発表する前のFT方式のCCD<sup>25</sup>)。』と言ってCCDカメラにディスプレイを繋いで見せてくれたんです。後にTompsettはそれをISSCCの場で、『これが世界で初めての固体撮像素子だ』と、彼自身がデモンストレーションをして見せました。それが非常に印象に残っています。」

スタンフォードでの留学生生活を終え、日立中研に帰った久保は、半導体技術のメインストリームがバイポーラからMOSへ、とりわけ微細化やスケーリング則の追求という大きなうねりとなって変わりつつあることを感じ、MOS-ICの2つの応用研究に没頭するようになる。一つは、いわゆる当時のMOS-ICの「本流」であったマイクロプロセッサの研究開発に取り組み始め、1976年にスタートした「超LSI技術研究組合」<sup>26</sup>に参画することになった。もう一つは、MOS-IC技術の応用としては垂流の扱いであったが、イメージセンサの研究に取り組み始める。研究者としての久保の持論である、「ニッチからリッチへ」を自ら体現した行動であった。久保は当時をこう振り返った。

「研究所では誰もがやっていることを研究しても価値がありません。リッチからリッチは生まれない。ニッチが化ければリッチになりますからね。今でこそCCDをはじめとして、イメージセンサというものが認知されていますけれども、当時はマイクロプロセッサやDRAMが全盛の時代でしたから、イメージセンサは“ゲテモノ”的な扱いをされました。」

こうして、久保率いる研究チームは手始めにファクシミリ用のスキャナに使うラインセンサ向けに、独自方式(バルクチャージ式)のCCD開発に着手した。画像を撮像するイメージセンサはエリアセンサゆえに歩留まり(良品率)が非常にシビアになるため、まずは比較的取り組みやすいであろうラインセンサをテーマにしようと考えた結果の久保の決断であった。ラインセンサではあったものの、久保が初めて手がけたイメージセンサは、MOS型イメージセンサではなくCCDだった。

そしてこの開発着手からしばらくして、研究所の上層部から「固体(撮像素子)でカメラをやれないか?」との命令が下る。1977年のことであった。久保自身、部長職になりた

で非常に多忙な時期であり、「家庭用ビデオカメラの実現に向けた固体撮像素子の開発」という重要なミッションを抱える **Playing Manager** となった。

### CCD か MOS 型イメージセンサか？ ～イメージセンサのデファクトを巡る究極の選択～

家庭用ビデオカメラの実現に向けて、久保のチームは開発対象となる具体的なイメージセンサの検討を開始する。当時の学会・研究発表レベルの CCD でも十数万素子程度のものであったが、NTSC スタンドアード<sup>27</sup>で綺麗に画像を出力しようとしたら、少なくとも 40 万素子は必要だろうという結論に達し、ターゲットの画素数が決定した。そして次に最大の技術検討課題についての意思決定が行われた。CCD か MOS 型イメージセンサか。現在から振り返っても、イメージセンサという半導体デバイスのイノベーションの歴史にとって、最大の分岐点となった 2 つの選択肢のうち、久保は迷うことなく MOS 型イメージセンサを選んだ。その動機こそ、久保が述べた先の言葉にあった。

「どうして CCD ではなく、MOS 型イメージセンサを選択したのか？」という私の問いに対して久保は、「イノベーションに関する意思決定」という技術経営課題を考える上で極めて重要な示唆に富む回答を返した。

「先ほどもお話した通り、僕は CCD の開発も少々手がけた経験があったため、CCD の長所も短所も理解していました。ラインセンサまでは CCD をやりましたが、エリアセンサというときには、迷うことなく MOS 型を選びました。当時、イメージセンサと言えば CCD の開発が主流でしたが、最初はニッチだけれどもある程度の段階までいったら、業界全体で皆が取りかかってくることで技術開発が進むというのが僕の信念なんですよ。そして、僕の直感ではありましたが、その頃はまだ十分に CMOS 技術が確立されておられませんでしたけれど、“産業のインフラ”という観点から見ると、MOS は LSI やメモリに広く使われていたので、世界中がこぞってプロセス開発や設計技術開発を進めていくわけだから、イメージセンサという、ある意味では特殊なデバイスかもしれませんがそういった技術開発の流れの上に乗っていくだろうと考えたのです。」

更に彼は、もう一つの理由として、次のように述べた。

「まあ、少なくとも安くはなるだろうと、これは最初から確信していました。僕は研究所にいながら、“コスト”ということをものすごく意識しておりました。研究所にいと、殆どの研究者は、“性能”を追求します。やはり研究所における評価軸というのは、“性能”ですからね。しかし当時から僕は、『性能を 10 倍にすることと、原価を半分にすること、そして信頼性を 10 倍にすることは同じ価値がある』という信念を持って研究していました。当時は CCD を評価する時に、殆どの研究者は、性能しか見ていませんでしたが、コストのことを考えたら、CCD は果たしてどうなのかということも僕は考えていました。つまり、コストの安さ、ローパワーである点、MOS 技術の産業インフラが整備されつつあり、今後とも進展していくであろう点、そして“適用性”、つまり、つぶしが利く技術（：もしその応用でうまくいかなかった時でも、何か他の応用が出来るような性質を持つこと）であることも重要で、MOS 型はそうした意味でも僕が考えていた条件を満たしていました。つまり、画質以外のファクターでは MOS 型イメージセンサの方が CCD よりも圧倒的に優れていたため、MOS 型イメージセンサを選択したのです。僕はいつも、セールスポイントというのは一つでは足りない、常に二つか三つを持てるようにしなければならぬと思っていました。当時、社内からは『何故 CCD をやらないんだ。』という声も少なくありま

せんでしたが、その技術（MOS型）に自分が固執しようとしたら、それを裏付ける為の根拠と信念を持たなければなりませんからね。」

こうして MOS 型イメージセンサを選んだ久保らは、その撮像素子に「MID (MOS-Imaging Device ; MOS型イメージセンサ)」と命名した。日立が MID で名乗りを上げたこの時期以来、本格的なイメージセンサ開発競争の火蓋が切って落とされた。

当然、日立にとっての最大のライバルは CCD であり、そのトップランナーであるソニーだったことは言うまでもない。上記の理由から CCD ではなく MOS 型イメージセンサを選んだ久保に対し、CCD を選んだソニーの越智は次のように振り返った。

「あの頃の MOS 型センサというのは非常にノイズが多く、確かに MOS の技術を使えばそのままイメージセンサができるので、そういう点では易しいけれども、我々ソニーがやるべき道は MOS 型センサではないと考えました。我々が欲しかったのは、光があまり当たらない低照度のところで S/N 比が良いカメラであり、そうでないと家庭用では自由自在に扱えないと考えていました。」

互いの方式の優位性をアピールし合い、激しく競い合っていた両社であったが、結果的に世界で最初の固体撮像素子を使った家庭用ビデオカメラを商品化したのは MID を選んだ日立の方だった。

**図6. 日立が1978年に最初に製品化したMID(左)と、これを採用し、試作発表したビデオカメラで撮影した画像(右) (筆者撮影)**



**図7. 固体撮像素子(MID)を採用した初のビデオカメラ (1981年 ともに日立製作所)**

**VTR非一体型家庭用ビデオカメラ「VK-C1000」**

**VTR一体型家庭用ビデオカメラ「マグカメラ」**



(出典：独立行政法人 国立科学博物館 産業技術史資料情報センターWeb サイトより)

特に1981年に日立製作所をはじめ、日立グループが総力を結集して開発した“マグカメ

ラ”は、固体撮像素子（MOS型イメージセンサ）と、1/4 インチビデオテープを使用した小型VTRで構成された、片手撮影可能な世界初のカメラ一体型ビデオであり、久保はAV分野で極めて権威のある賞で、当時「コンシューマ・エレクトロニクス部門におけるノーベル賞」とも呼ばれていた(旧)西ドイツの「Eduard Rhein賞<sup>28</sup>」を、デバイス部門においてソニーの越智らと共に受賞した。

MID とそれを採用したマグカメラはそれぞれ月におよそ 10 億円の売上と、3 億円程度の利益を出す事業となった。

### 姿を消した MID ～「暗黙知の伝達経路」の断絶がもたらした MID 開発プロジェクト崩壊～

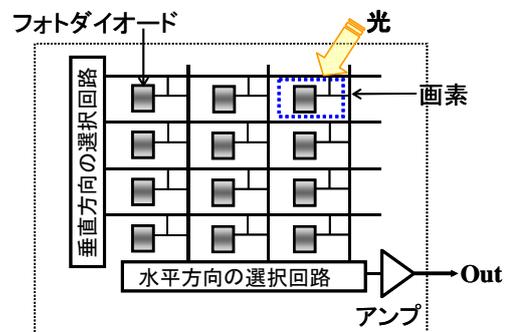
こうして、最大のライバルであったソニーの CCD に先駆けて世界で初めて、固体撮像素子採用の家庭用ビデオカメラ商品化という偉業を成し遂げた日立であったが、この年から数年と経たないうちに MID は、そして日立はその後のイメージセンサの歴史から忽然と姿を消した。これは一体何故か。イメージセンサのイノベーションにおいて、現在でも先頭を走っていて然るべきだった日立に何が起きたのだろうか。この奇妙な事実について尋ねると、久保は一瞬目を瞑り、記憶を一つ一つ呼び覚ますように当時の出来事を振り返った。2 つ目の疑問を解く鍵は「暗黙知伝達経路の断絶」にあった。

MID を撮像素子として家庭用ビデオカメラを上市にこぎつけた日立であったが、MID はその頃から、「感度が CCD に及ばない」、そして「FPN が除去できない」など、画質面の欠点について指摘がなされるようになり、開発リーダーである久保に対する日立社内での圧力も徐々に強まっていった。

MOS型イメージセンサは、CCDに比べるとシンプルで作りやすい構造である。まず光をフォトダイオードで受けてX-Yの2次元に配置したフォトダイオードからの出力を、アドレス回路でスイッチングし、配列順に読み出すという簡易的な仕組みのセンサであり、各画素に信号電荷を増幅するアンプを持たない構造の非増幅型センサ(Passive Pixel Sensor : PPS)<sup>29</sup>だった。構造的には単純であり、製造面においてCCDに対して優位性があったものの、PPS方式ではこの読み出し線に信号を出力する際に、読み出し線に入り込む駆動信号のノイズがFPNとして残り、これによりS/N比（信号対ノイズ比）が低下し、画像として出力した時に縦スジとなって視覚的に目立ってしまう欠点があったことで、CCDの転送方式と比較すると画質面でボトルネックを持っていた。

#### 図 8. MOS型イメージセンサ(PPS)の構造及び原理

MOS 型イメージセンサは、CCD と異なり、任意の画素値を読み出すことができるランダムアクセス方式であり、これがこのイメージセンサの大きな特長の1つである。しかし、PPS 方式では、解像度の増加に伴い、行、列読み出し線の寄生容量が大きくなることにより、読み出し感度、画質が低下するという欠点があった。



しかし久保は、MID が秘める可能性の大きさを見抜いており、誰よりもそれを強く信じ

ていた。前述の通り CCD は画質には優れるものの、複雑な専用製造工程が必要となるため、どうしてもコストが高くなり、構造上 1 チップ化ができない点、消費電力が大きい点、高速化が難しい点など多くの弱点があり、これに対して MOS 技術をベースにした MID は、画質以外の殆ど全てのファクターにおいて CCD を凌駕する特性を持っていた。CCD は、MID が持っているこうした数々の特性に追いつくことは、その構造および性質上不可能であるが、MID が当時 CCD に劣っていた画質面については、回路技術の持続的イノベーションの積み重ねによって、いずれ CCD にキャッチアップ出来るという強い信念を久保は持っていたのである。特に、メモリやロジック LSI に代表される MOS-IC 技術の進展とともに、コストを指数関数的に低減させていけるということはこの時点で見抜いていた久保の洞察力は、2007 年現在、MID の思想をベースにした「CMOS イメージセンサ（後述）」が再び CCD を置き換えようとしている事実を見ると、まさに慧眼であったという他ない。

日立社内で高まりつつあった MID 開発プロジェクトへのプレッシャーに対し、久保は 1983 年 4 月 11 日に、プロジェクトリーダーとして今後の開発方針を示すレポートを書き上げ、当時の二人の副社長をはじめ、研究所長、事業部長、その他関係者に配布し、MID 開発継続の重要性を強く主張している。以下はそのレポートからの抜粋である。

『**固体撮像素子の研究開発長期計画**』（1983 年 4 月 11 日 久保征治）

**（1）固体撮像素子の性能改善動向**

VLSI 技術の進歩と共に、プロセスの微細、高精度化が進む。この結果、性能改善（感度向上）が期待できる。しかしカメラ用としてバランスの良い特性を得るためには、感度以外の項目の課題をクリアする必要がある。

**（2）固体撮像素子及びそれをを用いたカメラのコスト低減動向**

・固体撮像素子のコストは①欠陥密度（歩留り、加工難度）、②量産効果に依存。計算すると、固体撮像素子の量産個数が 300k 個/月レベルになると 10 年後には現状（3k 個/月）の 1/6 のコストになろう。

・CCD は解像度の点等で、MID に比べて常に一世代先のプロセス技術を必要とする。このオーバーヘッドはプロセス導入期で約 10 倍、プロセス熟成期でも 2~3 倍のコストアップ要因を生ずる。

しかし、こうした開発プロジェクトの現場に醸成されていた粘着性の高い暗黙知を汲み取り、意思決定者層にそれを伝え、イノベーションに帰着させることのできる者は当時の日立には存在しなかった。開発現場とトップとの間の「暗黙知の伝達経路」が完全に断たれていたのである。久保は語る。

「本当の意味でのイノベーションというのは、やはり発明と同時に最終的に事業になっていかなきゃダメだと思います。もちろん僕の責任もあると思いますが、一番大事なのはやはり研究開発のマネジメントというか、そこを担当する方の器なんですよね。最初に MID のプロジェクトを引っ張ったマネジメント職の研究所長はお釈迦様みたいな方で、僕らは自由奔放にやらせて頂きました。ところがその次の次の所長は MID のプロジェクトに否定的でした。我々開発現場とのコミュニケーションも中々うまくいかずに、結果的に僕は 1985 年に MID の開発から外れ、中研から出ることになりました。」

更に彼は、未踏の分野を切り拓く不確実性の高い研究開発プロジェクトにおいては、言

うなれば“三位一体”であることこそが成否を分ける重要な要素であるという極めて興味深い指摘を行った。

「今にして強く思うのは、イノベーションを完全に定着させるためには、まず筋の良い技術であることを前提として、一つ目に〈意志の強い研究者とプロジェクトリーダーのチーム〉、そして次に〈研究開発マネジメントをする人の執念〉、もう一つは〈事業のセンスと洞察力のある経営トップ〉がいないと決してうまくいかないということです。このうち、一つでも崩れたら最早打つ手がありません。僕はもう既にその時は工場の方に移っていましたが、トップやその意向を酌んだ研究所長の意思決定はそのままMID開発中止へと行き着きました。当時のトップはいわゆるメインフレーム時代のコンピュータ事業出身で、“日の丸コンピュータ構想”から、“IBM コンパチ戦略”への転換を打ち出した方でした。彼は自らにとって専門分野でない半導体やイメージセンサを見たときに、雑音の多さなど性能改善で苦勞している点のみでMIDを判断し、『ソニーのようにCCDをやってはどうか。』と言われました。しかし、その頃にはもうソニーやシャープからも性能の良い素子が出てきており、他社の後追いをしても状況は好転せずに、結果的には撤退ということになりました。僕や僕の後輩が生み出した事業の行く末を、僕は工場で見届けました。」

CCDのイノベーションの歴史について当時の関係者にインタビューをしていくと、筆頭対抗馬であった日立におけるMIDの話、そしてそのリーダーであった久保の名前が必ずと言って良いほど挙がったが、この事実について知る者は少ない。

久保が中研を去った後、MID開発プロジェクトは事実上崩壊し、日立が後のイメージセンサの歴史から姿を消し始めるきっかけとなったこの1985年は、奇しくもかつて激しく競い合ったソニーから、爆発的な大ヒットとなり、同社をビデオカメラおよびイメージセンサの王者たらしめるきっかけとなった“CCD-V8”の発売という金字塔が打ち立てられた年でもあった。

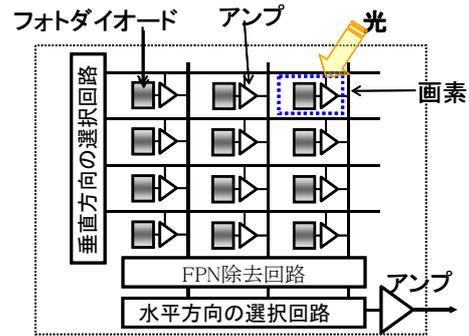
## 技術の輪廻

久保が去り、ソニーから“CCD-V8”が発売されると、日立のMOS型イメージセンサは80年代後半からCCDに対する競争力を失っていき、終には製造の中止を余儀なくされた。その後一時はCCDに完全に駆逐され、「固体撮像素子=CCD」という等式が成立する時代が長く続いた。

しかし1993年、米国NASAのJPL（Jet Propulsion Laboratory：ジェット推進研究所）<sup>30</sup>にいたEric.R.Fossumによって提案された、「CMOS-APS（Complementary Metal Oxide Semiconductor Active Pixel Sensor：CMOSプロセスで製造された、画素ごとに信号電荷を増幅する機能を持ったイメージセンサ）<sup>31</sup>」の登場を契機として、これまでの等式が徐々に崩れ始める。日立が開発していたMOS型イメージセンサ（PPS）のノイズ課題は増幅で解決（各画素にアンプを配置し、ノイズが入る前に増幅）し、回路的な改善アプローチ<sup>32</sup>により、かつてのMOS型イメージセンサの課題であったFPNを少なく抑えこむことに成功。CCDにとって揺ぎ無い競争優位であった画質面において、以前は歴然と存在していたその差を着実に縮め始めた。

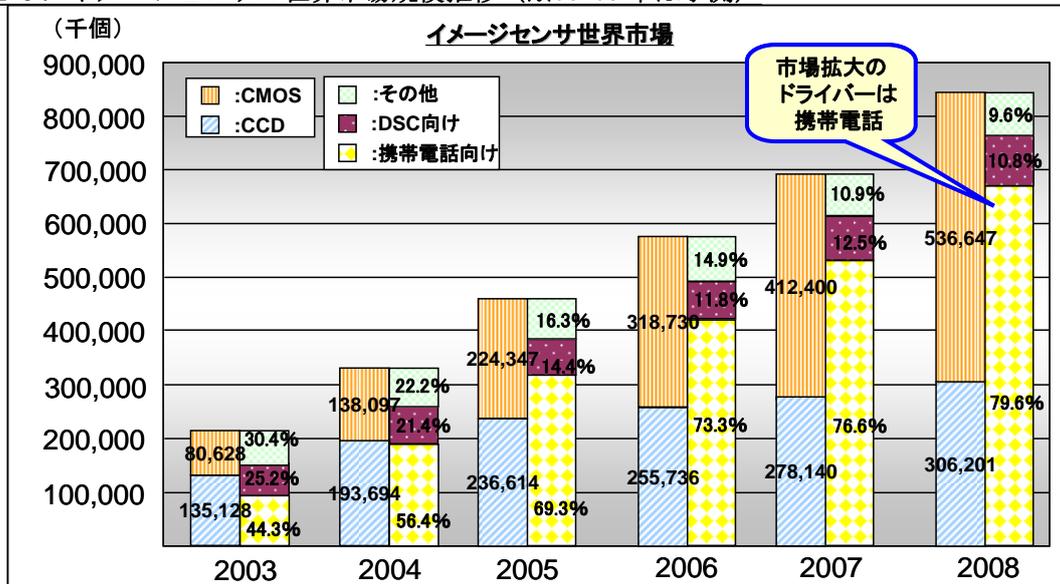
図 9. CMOSイメージセンサ(APS)の構造及び原理

フォトダイオードで光電変換を行い、画素ごとに信号を読み出して増幅、選択して出力。FPN(固定パターンノイズ)除去回路も内蔵している。



加えて CCD とは異なり、汎用の CMOS プロセスを使うことによる低コスト化（生産設備の転用）、他の機能ブロックとのワンチップ化（システムオンチップ化）、バケツリレー方式でないため転送のための他種類の電源が要らず、単一電源で駆動可能なことによる低消費電力化、X-Y アドレッシング方式による高速読み出し機能、更にはスミアが原理的に発生しない等の特長が、最初はウェブカメラのような低画素のカメラ、そして高画素化・高感度化が実現するにつれ、90 年代後半に入ると、携帯電話という「お化けアプリケーション」のニーズを満たし得るようになり、現在では携帯電話用カメラの撮像素子としては、CCD をほぼ置き換えつつある。(図 10 参照)。久保はこうした技術の変遷を「輪廻」に例えて表現した。この点についての見解を求めると、ソニーの越智は次のように語った。「当時の MOS 型センサは、セルの中でインピーダンス変換やゲインアンプをしていなかったから非常に Noisy にだったのに対し、現在の CMOS イメージセンサはそれらをセルの中で行いますから、ノイズは少なくなっています。日立はせっかくあそこまでやったのだから、あのまま続けていれば、今頃ものすごいシェアを持っていたかもしれませんね。」

図 10. イメージセンサの世界市場規模推移 (※06-08 年は予測)



(出典：データガレージ、日経マーケットアクセスを元に筆者作成)

### 3. 総論

ベル研究所の Boyle と Smith によって CCD の基本原理の発表が行なわれた 1970 年から 2007 年現在までのイメージセンサのイノベーションプロセスを大きく 2 つに分けると、ソニーが家庭用 8mm ビデオカメラ “CCD-V8” の発売によって半導体イメージセンサが真の意味での実用化レベルに到達した 1985 年までの 15 年間は「ノイズ」と「キズ」との闘いの歴史であり、この期間を第一世代のイノベーションと考えることができる。その後現在まで続く第二世代は高画素化、微細化、チップ縮小といった、性能やユーザビリティを引き上げるためのインクリメンタルな技術改善の歴史であるといえる。本ケースではこの第一世代(1970-1985)のイノベーションに光を当て、稀有なリーダーであったソニーの故岩間和夫氏の逸話から、「トップマネジメントによるイノベーションに関する意思決定」という極めて貴重な技術経営課題を改めて提起した。

また、異なる経路を経て結実した二つのイメージセンサのイノベーションの歴史を辿り、研究開発テーマの決定、ならびにイノベーションの分岐点における技術の目利き・判断基準等についての考察を行うとともに、本ケースを通して、例えば以下の論点について議論を交わすことで、今後のイノベーションマネジメント再考の一助となれば幸甚である。

- 【論点①】 何故、規模に劣っていたソニーがこのイノベーションの担い手となったのか？
- 【論点②】 何故ソニーの CCD プロジェクトは 15 年ものデスバレーを乗り越えられたのか？
- 【論点③】 トップマネジメントは自社の研究開発に対してどのように向き合うべきか？  
～イノベーションに関する経営判断について～
- 【論点④】 なぜ日立製作所（久保）は MOS 型イメージセンサを選択したのか？
- 【論点⑤】 何故先行者であった MOS 型イメージセンサ、そして日立が突然姿を消したのか？

【脚注】

- 1 元ソニー株式会社常務取締役メディアプロセッシング研究所長
- 2 Metal Oxide Semiconductor(金属酸化膜半導体)。金属電極に印加した電圧により半導体側に自由電子やホールを誘起して、電荷を運搬し、電流のオンオフ動作を行うトランジスタ。現在の半導体(IC/LSI)の最も基本となっている素子である。  
自由電子によって電荷の運搬を行うものを nMOS(negative MOS)、ホールによって行われるものを pMOS(positive MOS)、両者を組み合わせて動作速度を向上させたものを CMOS(complementary MOS)という。MOS 構造を利用した IC は高集積化が可能であり、消費電力も少ない。
- 3 Bipolar Transistor(接合型トランジスタ)。Bi=「2つの」 Polar=「電極」を現し、2つの電極を持ったトランジスタである。最初に発明されたトランジスタはこのバイポーラ型であり、MOSトランジスタと比較して増幅率が大きい、増幅のために電流を必要とするため、消費電力が大きい。
- 4 泡磁区素子ともいわれる薄膜デバイス。単結晶磁性薄膜に垂直の磁場をかけると微細な泡状の磁化の方向の異なる磁区が薄膜中に多数でき、この泡磁区の有無により記憶素子として利用できるデバイス。
- 5 W.S.Boyle and G.E.Smith “Charge Coupled Semiconductor Devices”, Bell System Technical Journal pp.587-593 Apr.1970
- 6 太陽や電灯、明るい照明など、強い光源が含まれる写真を撮った際に、垂直方向に白い帯状の筋のような光が発生する現象。電荷転送中にCCDが強い光にさらされると、1つの垂直転送用CCDに納まりきれずに飽和した電荷は、隣の垂直転送用CCDに漏れ出してしまう。これが連続して漏れ出すと、その光がさらに元の電荷に加えられ、結果的に、写真には縦方向に漏れた電荷、すなわち縦方向の光の筋として表現されてしまう。
- 7 この年、フィラデルフィアのペンシルバニア大学で開催された「半導体のオリンピック」とも呼ばれる、現在でもなお半導体業界で最も権威のある国際学会「ISSCC」に、日本人第一号の出席者として参加したのが岩間であることはあまり知られていない。
- 8 1957年東京通信工業(現ソニー)入社。元ソニー中央研究所副所長
- 9 高崎晃昇。元ソニー専務。当時厚木半導体工場長、中央研究所副所長
- 10 フォトマスク(Photo Mask)の略。半導体製造過程で用いる原板。石英などのガラス基板上に回路パターンが描画されており、露光によって、シリコンウェハ上に塗布されたレジストにパターンを転写し、エッチング工程等を経てシリコンウェハ上に回路パターンを形成する。
- 11 CCDの素子・回路に起因するノイズには、「フォトダイオードの暗電流ノイズ」、「電荷検出アンプノイズ」、「周辺回路からの誘導ノイズ」、「転送ノイズ」、「揺らぎノイズ」、「熱ノイズ」などが挙げられる。
- 12 画素の極小化により、入射光が強い場合に過剰に発生した電子が隣りの画素や信号線、電荷転送部などに漏れ出すことにより発生するもので、画像には白く淡い光が当たってボケる現象として出現する。現在では、不要電荷の掃出し回路構造によって軽減することが可能になっている。
- 13 S.Kawado, Y.Hayafuji and T.Adachi(Sony); “Observation of Lattice Defects in Silicon by Scanning Electron Microscopy Utilizing Beam Induced Current Generated in Schottky Barriers”, J.J.A.P,14(1975) No.3
- 14 面状の格子欠陥(面欠陥)の一つであり、結晶を構成する原子の積み重なりの不規則性が引き起こす欠陥。余分な原子面が入ったタイプを extrinsic 型積層欠陥、原子面が抜けたタイプを intrinsic 型積層欠陥と呼ぶ。
- 15 物質の純度が 99.999999999%であること。9が11個並ぶことからこう呼ばれる。
- 16 外部から導入する歪みをゲッターシンクとするExtrinsic Gettering法と、結晶内部の欠陥を用いた Intrinsic Gettering法に大別できる。
- 17 その他にも、フレーム・インターライン・トランスファ方式(Frame Interline Transfer; FIT)などがある。
- 18 M.H.White ,et al; “Characterization of Charge-Coupled Device Line and Area-Array Imaging at Low Light Levels”, ISSCC Dig.Tech.Papers,1973, pp.871~874  
岡田静夫; 高密度構造インターライン転送方式 CCD 撮像素子, 電気通信学会 半導体トランジスタ研究会, Vol.SSD78-5,1978
- 19 全日空はそれまでロッキードのジャンボジェット“トライスター”を使う予定だったが、1976年のロッキー

---

ド事件がきっかけで、ジャンボジェットの内入先をボーイングに切り替えた。するとライスターならば納まっていたはずの顧客サービスの為の撮像管カメラが、コックピットの小さいボーイング 747 には入らなくなった。

- 20 のちに副社長。放送業務用VTRの開発・販売を指揮していた。
- 21 CCDは 2/3 インチ、12 万画素、画素ずらし 2 チップ構成、外形寸法 6.8cm×7.5cm×26.6cm、重量 1.3kgのカラーカメラ。
- 22 更に遡れば、1963 年、HoneywellのS.R.Morrisonによる「Photosensitive Junction Device」というフォトスキヤナに端を発する。
- 23 G.P. Weckler:“Operation of p-n Junction Photodetectors in a Photon Flux integration Mode”, IEEE J. Solid-State Circuits, SC-2, pp.65-73,1967
- 24 開発発表および製造年は 1980 年。
- 25 『M.F.Tompsett, et al.; “Charge-Coupled Imaging Devices : Experimental Results”,』 IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-18, No.11, pp.992-996, 1971
- 26 国家主導の産官合同の取り組みで、唯一成功を収めたと言われているプロジェクト。通産省は、日本の将来を担う中心的産業にコンピュータと通信を指定し、それらの産業の根幹となる超LSI技術を開発する目的で、1976 年に「超LSI技術研究組合」を発足させた。期間は 1976 年～1980 年の 4 年間で、総額約 700 億円のプロジェクト費用は、政府と参加企業が折半するという官民共同の半導体プロジェクトであった。参加企業はNEC、東芝、日立製作所、富士通、三菱電機の 5 社。さらに、50 社にもおよぶ半導体製造装置メーカーも参加した。このプロジェクトの成功の背景には、IBMという共通の敵の存在があった。
- 27 アメリカのNational Television System Committeeによって制定されたアナログテレビジョン方式の標準規格。
- 28 旧西ドイツのメディア王であったEduard Rhein氏により創設され、毎年最も優れた功績を上げたコンシューマ・エレクトロニクス分野の商品及びデバイスに対して授けられた賞。報奨金も 5 万マルクと、当時としては高額であり、名実ともに価値ある賞だった。
- 29 CCDもPPSである。
- 30 MOS型イメージセンサの開発が再び熱を帯び始めた直接的な契機は、NASAでは宇宙計画の一環としてローパワーかつコンパクトな撮像素子開発が望まれていて、シリコン基板上にセンサ、アンプ、駆動回路、画像補正回路等を載せて 1 チップ化でき、しかも単一電源で駆動するカメラ開発を目指していたという背景があった。
- 31 E. R. Fossum, “Active Pixel Sensors: Are CCD’s Dinosaurs?,” in Proc. SPIE, vol. 1900, pp. 2-14, 1993.
- 32 松長(東芝)ほか、『CMOSイメージセンサのノイズキャンセル回路』映像情報学会技報,vol22,No.3,pp7-11(1998) オンチップでFPNの除去を実現する回路。