

〔研究ノート〕

オープン・イノベーション・ワールド探訪Ⅱ

—技術転換と競争環境の変質

福 島 英 史

1. 本稿の目的

本稿は、米国の経営学者 H. Chesbrough が提唱したオープン・イノベーション (Open Innovation) の概念を検討して独自の解釈を示し、画像半導体産業の転換史をもとにその正当性と含意を確認する研究の一部である¹。前稿に引き続き画像半導体イメージセンサの産業史研究から²、その主流技術の転換プロセスにおいて、国家や地域「イノベーション・システム」としてのオープン・イノベーションの世界がどれほど色濃く観察されるかを確認していく。

2. 画像半導体産業の競争環境

現在普及している CMOS イメージセンサは、1967年に提案された MOS 型イメージセンサと少なくとも2つの異なる特徴を有している。第1に、メモリ等の半導体製造工程として事実上の標準になった CMOS プロセスを使って製造されることである。第2に、画像の感度を高めるために、1つ1つの画素に光から電気に換えられた信号を増幅するトランジスタをもうけていることである。後者は技術的に重要であるが、前者が強く産業の性質を特徴づけている。現実には、2000年代に CCD を置き換えていくための高画質化のプロセスで、CCD に1980年代初頭から導入されていた「埋め込みフォトダイオード」製造プロセスが CMOS イメージセンサで採用されたため、半導体の全くの汎用製造プロセスではなくなっていく³。しかしそれでも7割以上が汎用プロセスであって、高価な専用設備を使って製造していた CCD とはまったく異なる世界が現れることになる。汎用の半導

体製造設備が利用できるという特徴は、いくつかの重要な意味を持っていた。

まずは「Camera-on-a-Chip」(ワンチップカメラ)の構想である。マイクロプロセッサやメモリが主導して年々微細化が進む加工技術を使って、従来は別チップとして最終製品に載せられていた、カメラとして必要な様々な画像信号の処理 ISP (Image Signal Processor) をイメージセンサ1チップに集積することが構想された。実際、画像の輪郭や動きを検出し、露出を制御し、解像度を変え、さまざまな情報機器で扱いやすいように画像データを圧縮し、デジタル信号として出力する機能が、イメージセンサに実装されてきている⁴。

また汎用の半導体製造設備が利用できるならば、半導体製造設備メーカーから設備を購入しさえすれば、容易にイメージセンサが製造できることになる。さらに、製造設備を購入しなくても半導体製造企業をファウンドリとして利用できる。設計に特化したファブレスとして、製造設備に投資することなく参入できる。1990年代から専業ファウンドリ (pure-play foundry) が CMOS イメージセンサを手がける。例えば台湾政府 (経済部) 所管の研究機関 ITRI (工業技術研究院: Industrial Technology Research Institute) からスピナウトした、UMC (聯華電子: United Microelectronics Corporation) が1980年から、TSMC (台湾積体回路製造: Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) が1987年から存在し、イメージセンサを手がけるようになる。同様に、イスラエルで1993年に設立された Tower Semiconductor (以下 Tower) も、サービス品目を絞り込んだスペシャリティ・ファウンドリとして、早期から CMOS イメー

ジセンサの製造サービスを提供している。

ただし CMOS イメージセンサは、設計や製造プロセスに独自の工夫があって顧客がこれを認識できなければ、容易にコモディティになる性質がある。携帯電話用の標準品単価は、近年では 1 米ドル前後である。参入が容易かつ多数で、一定水準の商品の販売にそれほどの困難が伴わず、価格低下圧力が大きいことが早期から予見されていた。特殊プロセスを使い、量産が難しかった CCD とは全く異なる世界へと移行した。利益を出すためには、独自の工夫をつくり出すための研究開発努力が欠かせない。そのため設備投資負担がほとんどないファブレス企業であっても、研究開発費負担が相対的に重いことが一般的である。技術開発の成果は次々と特許化され、ソニーや Samsung 電子、Aptina（現 ON Semiconductor）のような大手企業は、クロスライセンスを結んでいる。OmniVision が Kodak のイメージセンサ特許 850 個を 2011 年にまとめて購入したように⁵、関連特許や関連技術の特許単位あるいは企業ごと買収することが慣例的に行われている。

筆者が数えたところでは、今日までに撤退済みの企業を含め各国から 87 以上の企業が参入している。これは CMOS イメージセンサ供給企業だけで、CCD のみを供給する企業を含まない。また製造のみを担当するファウンドリや、組み立て・検査工程のみの担当企業を含まない。ただしメディアにほとんど登場しない企業もあるため、これにはおそらく多くの漏れがある。前稿の図表 7 にみられるように⁶、2014 年度の数値ベースで上位 10 社が市場の 98% を占め、0.3% 以上のシェアを持つ企業が 12 社ある。各社の上場目論見書等によれば、40 社～60 社が各時期の CMOS イメージセンサ事業に取り組んでおり、ほとんどがニッチ分野で活動している。主用途としてカメラフォンの世界市場が徐々に立ち上がり始め、調査会社が本格的に集計を開始する 2003 年は、上位 10 社で 95% の出荷数を占めている。2003 年から 2014 年までに 3 ポイント寡占化が進んでいるほか、市場規模の拡大と市場地位の変動は激しいが、上位 5～6 社が大きなシェアを占める構造であること

に変化はない。Techno System Research の集計によれば、金額ベースでも上位 8 社で市場の 9 割強を占める⁷。

イメージセンサは半導体製品であって、半導体産業で一般的な、設計に特化したファブレス形態での事業展開がよく見られる。ただし、ファブレスとファウンドリのパートナー関係はしばしば出資をとめない、時としてファウンドリが設計担当のファブレス企業を設立してイメージセンサ事業の運営に当たらせることもある。両者の関係は一般的な想定とは異なり、日本等でみられた長期取引に近いケースがある。短くても 2・3 年間、長い場合は 20 年間に及ぶ取引関係が築かれている。取引には出資や役員派遣を伴うことが珍しくない。顧客とサプライヤの共同開発が、一般的なイメージセンサ企業とファウンドリ企業の間で観察される。それは ICT 産業のモジュール化から容易に類推される単発的なアームズ・レングズの市場関係とは根本的に異なっている。少なくとも画像半導体産業において、自動車産業について言われるようなサプライヤ・顧客間の「すり合わせ」とは異質であるかもしれないが、日日企業間であれ、米台企業間であれ、韓中企業間であれ、事業化に必要なすり合わせは、しばしば中長期的になされていた。大半が汎用プロセスとはいえ、レンズ挿入工程や埋め込み PD 工程など特殊工程がないわけではない。また各社が強みとしたい設計での独自性があるから、関係特殊投資が少なからずある。そのため中長期の取引関係がしばしば結ばれる。ただし単一のファウンドリへの過度な依存を避けるため、少量でもセカンド・ソースをもつのがファブレスでは一般的であった。大部分が汎用的な CMOS 工程で製造されているため、ファウンドリは、他のより収益性が高い商品の製造を受注すれば、そちらを優先する可能性がある。

ファウンドリのような製造に特化した業態でなくとも、イメージセンサに参入する半導体製造企業が相応にあった。主力事業の DRAM やフラッシュメモリの製造で利用し、償却が済んだ工場生産ラインを、汎用の半導体 CMOS 工程が使えるという理由で CMOS イメージセ

ンサ製造に利用してきた企業群である。生産ラインの転用は、設備投資の負担を償却済みであるため、低い固定費での事業展開を可能にする。これは CMOS 以前の 1970~80 年代に、日本の日立製作所が nMOS イメージセンサの事業化で考えてきたことであり、CMOS 転換以降は、Micron、Samsung 電子、SKHynix、東芝、STMicroelectronics（以下、ST）など各国の大手半導体企業が同様の論理を想定して、同事業に参入、展開を図ってきた。他方、このような製造ライン転用の利益に必ずしも浴せず単に、主流技術の転換に対応しようとした大手企業もあった。それが CCD のときに黄金時代を築いたソニー、パナソニック、シャープなどの日本企業であった。ただしソニーは工程の一部 ISP 部分の製造を TSMC・富士通に委託するようになり、シャープは韓国 PixelPlus に CMOS イメージセンサの OEM 供給を受け、パナソニックは半導体事業を再編してファブレス化するなど、かつてのように IDM としての垂直統合体制を維持していない。

ほかに記しておく必要があるのは、CMOS イメージセンサにレンズをつけ、オートフォーカス技術などを付加してカメラ機能を実装した「カメラ・モジュール」に仕上げる、カメラ・モジュール企業である。これは最終製品である携帯電話等製造業者に、CMOS イメージセンサを届ける流通業者としても機能している。ST のように（東芝やソニーもある時点からそれを志向するが）CMOS イメージセンサ企業自らがカメラ・モジュールへの実装を手掛けるケースがあったものの、2000 年代からたかだか十数年の納入歴において、カメラ・モジュール専門企業が組み立て・流通の重要な基点として台頭している。韓国と台湾に有力企業が多く、2010 年代は Apple iPhone 向けにモジュールを出荷する韓国 LG グループの LG-Innotek の販売額が市場シェア首位となっている。日本企業では同じように Apple にカメラ・モジュールを納めるシャープが同シェア 2~4 位を近年維持している⁸。

さらに、主に中国のノンブランド・ローエンドのカメラ・モジュール市場を中心に、リファ

レンス・デザイン（reference design：参照設計）提供企業が CMOS イメージセンサ流通業者として重要な役割を担っていた。具体的には、1997 年設立の台湾 MediaTek（聯發科技）がテレビや DVD 同様に、携帯電話でもソフトウェアを含む完成度の高いリファレンス・デザインをメーカーに提供し、モバイル SoC 事業の拡大を図ってきた。メーカーは MediaTek にコンタクトすることで、部材の発注から設計・製造サービスまで一括してパッケージとして調達可能であり、少ない予備知識で短期に携帯電話向けにカメラ・モジュール事業を開始できたという。イメージセンサ提供事業者からすれば、こうしたリファレンス・デザイン流通業者にその一部として採用されることが、急成長していた中国市場にアクセスし、世界市場シェアを伸ばす糸口の一つになっていた⁹。

3. 転換の源流—CMOS イメージセンサの技術開発

シリコン・バレー形成期の米国に生じた撮像デバイス固体化の流れは、日本の大手エレクトロニクス企業による CCD 事業化に結実し、カムコーダやデジタルスチルカメラ（以下、DSC）の市場をもたらした。CCD から CMOS イメージセンサへの移行は、CCD でイメージセンサとその用途市場を席卷した日本に対する米国加州湾岸地域からの反撃であり、また事業のスピンアウト・創業・買収・売却を特徴とするシリコンバレー・モデルの世界的敷衍でもあった。論者に依じて意味や概念範囲が揺れ動くオープン・イノベーションとは、20 世紀末の米国で顕著になったイノベーション・システム、シリコンバレー・モデルの概念化であり、その正当性の確認であったと本研究では考えている。

現在の CMOS イメージセンサは、1 つ 1 つの画素に光から電気に換えられた信号を増幅するトランジスタをもうけた APS（Active Pixel Sensor）構造で、半導体製造工程として標準的な CMOS プロセスを使って製造される。1980 年代から 90 年代にかけて、APS 構造の技術開

発が日本を中心に行われる一方、画素に増幅トランジスタを持たない従来型の PPS (Passive Pixel Sensor) を、それまでの nMOS とは違う CMOS プロセスで製造し、事業化する試みが行われた。

まず APS 構造については、電機・防衛・通信をてがけた英国の老舗企業 Plessey において、1968 年に考え方が提案され¹⁰、翌 1969 年に試作が行われている¹¹。時を経て APS は、カムコーダへの搭載に向けて MOS 型イメージセンサと CCD が激しく実用化・事業化競争を繰り広げた 1980 年代に、その傍らで静かに研究開発が進められた。図表 1 に示されるように様々な種類の APS 研究開発主体のほとんどは日本企業で (TI は日本 TI が開発担当)、例外はあるものの、キヤノン、ニコン、オリンパスといったカメラ大手企業の名が並んでいる。当時オリンパスで APS 研究開発に携わった中村淳一氏によれば、研究開発の目的は「将来のイメージセンサの多画素化、画素微細化に伴う感度低下に

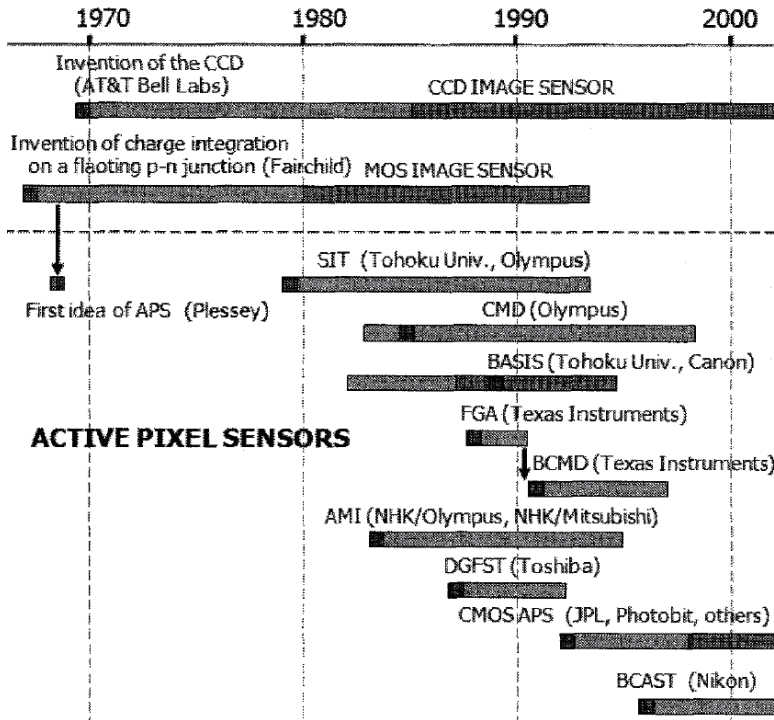
備え、画素内で信号を増幅することで高感度イメージセンサを実現」することであった¹²。1970 年代半ばから CCD の研究開発を進めてきた富士フイルムとあわせ、カメラ・写真大手企業のイメージセンサ開発努力は、1990 年代後半からの DSC 市場離陸で花開くことになる。しかしこれより早く、1980 年代から 90 年代にかけて、PPS および APS の研究開発のみならず、CMOS プロセスでの事業化に踏み切ったのは、各国のベンチャー企業であった。

4. CMOS イメージセンサ事業化のはじまり

4-1. IVP (Integrated Vision Products) —スウェーデンの大学スピンオフ

CMOS イメージセンサは、PPS の事業化が APS に先行した。筆者が 2014 年から 2016 年春にかけて行った調査にもとづけば、もっとも早く CMOS イメージセンサを事業化したのは、

図表 1. APS 型イメージセンサの研究開発



出所) 中村 (2010) 前掲論文、p.18, 図 1 を引用。

スウェーデンの IVP (Integrated Vision Products : 現在の Sick IVP AB) であると思われる¹³。IVP はスウェーデンの Linköping Universitet, Institutionen för systemteknik (リンシェーピング大学電気工学部) から 1985 年に、画像分析の研究開発に従事していたポストドクの Robert Forchheimer と Anders Ödmark によって設立された¹⁴。IVP 設立は、ベンチャー企業設立の促進を狙いとするスキームから補助金を得て行われた。1972 年に設立された Linköping 大学は、大学からの起業が活発であることが知られており、1997 年までに 40 社のスピノフがある¹⁵。同大学は、地元の事業者コミュニティとともに、1984 年に創業支援機関 SMIL (Small Business Development) を設立し、大学からの起業を支援している。従来は大学の産学連携室 Industrial Liaison Office を通じて非公式の「スピノフ・クラブ」が人的ネットワークを通じて支援してきたものの、1980 年代前半からスピノフが活発化したため、こうした機関の設立に至ったという。CMOS イメージセンサ事業化の先駆けとなった IVP の創業は、しばしば北欧の地域イノベーション・システム (Regional Innovation System) 事例として言及されるこうした Linköping 大学と地元による支援環境をその背景としていた¹⁶。

IVP は、1987 年には最初の製品としてライン型 CMOS PPS の LAPP 1100 を発売した後、1990 年に ADC (Analog-to-Digital Converter : アナログ・デジタル信号変換回路) と ISP を集積したエリア型 PPS の試作を発表¹⁷、1992 年にはエリア型 PPS で約 6.5 万画素 (256x256) の解像度を持つ MAPP2200 を開発している。MAPP2200 はソフトウェアとともに非破壊検査マシンビジョン・カメラ IVP Ranger に搭載され、同カメラは 1994 年に発売された。Ranger は顧客として木材産業を狙い、スウェーデンの木材検査機器メーカー最大手のすぐ隣に IVP の事務所が置かれた。1990 年代末になると IVP の経営陣は、事業成長のためのパートナーを探し始め、ドイツのファクトリー・オートメーション (FA) 機器メーカー Sick AG にコンタクトする。その結果、Sick は 1999 年に IVP 株式の

25% を出資、2003 年には完全買収に至った。経営学でかつてから議論されているような、新技術の事業化のためにベンチャー企業が創業し、やがて成長期に既存企業がこれを買収して事業の拡大を図るという行動パターンは、1990 年代から 2000 年代初めのイメージセンサ産業でも複数の事例を見ることができる。

4-2. VLSI Vision (Vision Group)

—スコットランドの大学スピノフ

IVP に続いて CMOS イメージセンサを事業化したのは、1990 年 5 月に英国スコットランドの Edinburgh 大学電気工学部 (Electrical Engineering Department) からスピノフした VLSI Vision である。同社のセンサも当初は PPS である。スコットランドは Linköping のように起業が活発な地域とは考えられていないものの¹⁸、Edinburgh 大学は比較的早期から積極的に研究成果の事業化に取り組み、実際に多数のスピノフ企業を生んできた¹⁹。同大学は、1969 年に英国で初めて技術移転・事業化機関 Centre for Industrial Consultancy & Liaison (CICL) を開設し、2009 年までの 40 年間に 200 企業がスピノフしている。同大学ホームページによれば、2014 年～2015 年にかけて年間スピノフ企業数が新記録の 44 社になり、同大学スピノフ企業数は 2015 年までの直近 10 年間で 315 社、累計で 400 社に上るといふ。CICL は、1983 年に UnivEd Technologies Ltd (UnivEd) として会社法人化され、1998 年に大学の Research Support Office と合併して、現在の Edinburgh Research and Innovation Ltd (ERI) がつくられている。さらに同大学では、スピノフ企業支援のために、1985 年にベンチャー・キャピタル・ファンドを組成し、1988 年にはキャンパス内にインキュベーション・センター Edinburgh Technology Transfer Centre を設立している。Edinburgh 大学は、研究者が早期に発明を公開し、大学がその事業化ポテンシャルを図って外部へのライセンス供与を模索するため、研究者との間に royalty-sharing agreement を結ぶ。VLSI Vision がそうしたように、スピノフ企

業は大学のロイヤリティ受取権利を購入することができる。

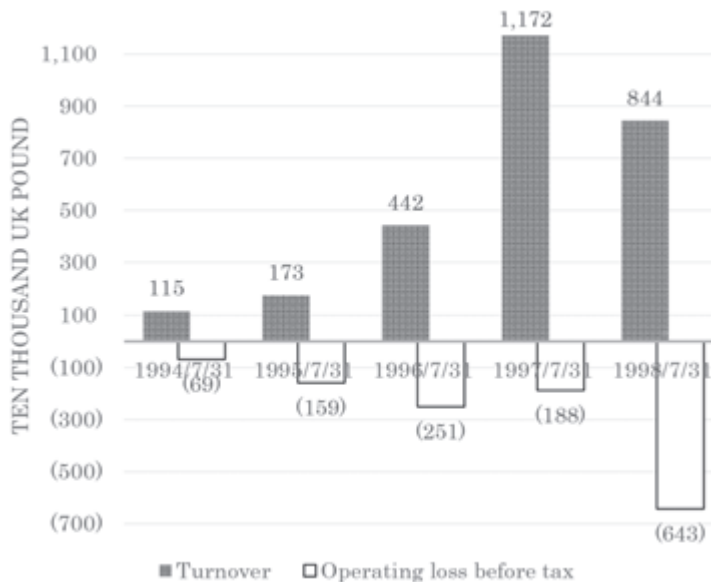
VLSI Vision は、創業5年後の1995年4月にロンドン証券取引所 (London Stock Exchange) に上場しており、スコットランドの大学スピンオフ企業で初めて株式公開したことで知られている。図表2に示されるように、上場前の1994年7月31日決算期から、STに買収される直前の1998年7月31日決算期まで、営業黒字を達成した財政年度はなく赤字拡大基調であったものの²⁰、創業7年後のピーク時には1172万ポンドの売上高を達成している。こうした早期の株式公開や事業の成長、大手企業による買収までをもって、英国の大学スピンオフベンチャーの成功例の一つとされる。上場に際して Vision Group に改称しているものの、その後も VLSI Vision あるいはその愛称 VVL と呼称されることが多かった。本稿でも以後 VVL と記す。

Edinburgh 大学教授の Peter Denyer らが VVL で事業化したのは、1990年に試作を発表した QVGA (312 × 287 画素) 解像度で自動露出やビデオ・タイミング制御の ISP 回路が集積され

た “a single chip video camera” であった²¹。その後事業展開した主用途にずれはあるものの、ISP 機能が集積された「ワンチップカメラ」CMOS イメージセンサの試作・発表の時期は、IVP とほぼ同じである。同センサの試作・発表は、VVL を創業する Edinburgh 大学の Peter Denyer、David Renshaw のほか、中国の東南大学からの客員研究員 Guoyo Wang と Mingying Lu の4人で行われており、彼らは2008年に、すぐれた研究成果に与えられる Rank Prize (オプトエレクトロニクス分野) を英 Rank Prize Funds から受賞している²²。VVL の CMOS イメージセンサは、創業および Edinburgh 大学での研究の中心人物であった Denyer が、1988年に、英セキュリティ印刷・紙幣鑑別システム企業 De La Rue 向けに行った指紋認識研究から生まれた。Denyer は認識システムの部品で最も高価なのがイメージセンサであると考え、その費用低減に努める研究を進めたのであった²³。

VVL の設立は、Edinburgh 大学の事業化機関 UnivEd によって行われた一方、設立や事業拡大のための資金は、大学のみならず、政府、一般の VC 企業、および顧客から提供を受けてい

図表2. Vision Group (VLSI Vision) の売上高及び営業損失推移



出所) Vision Group Annual Report を参考に作成。横軸は会計年度。

る²⁴。まず創業時に Edinburgh 大学が元手資本 (seed capital) を提供し、George Soros 氏が運営する Quantum Fund と、旧 Scottish Development Agency (SDA: スコットランド開発機関、後の SE) が 20 万ポンドの VC と開発融資 (development loan) を提供した。SDA と SE は、スコットランドにおける新たな事業を援助・奨励することをその目的の一つにしている。英国の Science and Engineering Research Council (SERC: 科学工学研究委員会) と、Department of Trade and Industry (DTI: 通商産業省) の「先進高密度チップ設計プロジェクト」からも資金助成を受けた。また VVL は、1996 年にイメージセンサをカラー化していく資金の一部に、Scottish Office Education and Industry Department (SOEID: スコットランド省教育産業局) の SPUR 助成金を活用している。SPUR 助成金は、中小企業が新製品・工法を開発する際に、試作品までの段階について助成するプログラムである。UnivEd からコンピュータ・エンジニアでもあった Roy Warrender が、営業担当取締役 (commercial director) として共同創業に加わり、当初社長 (managing director) を兼務した。

VVL は当初、家庭用防犯カメラ向けに自社イメージセンサを販売する計画を発表する一方、製品開発契約や、事業化のライセンス供与契約を結ぶことを主な業務にしていた²⁵。最初の事業案件は、警報システム開発の Automated Security Holdings (ASH) に、VVL イメージセンサ搭載の防犯システム開発権を販売したことであった。

しかし 1993 年に VVL は、3 つの自社製品を発売しており、うち 1 つの顧客は VVL の株主になって研究開発の資金を提供することになる²⁶。まず 1 月に 35mm 四方で「世界最小のビデオカメラ」と銘打たれた ASIS-1011-B、愛称「Peach」の開発・販売が発表された。QVGA (312 × 287 画素) 解像度の白黒カメラ・モジュールで、防犯システムやインターフォンへの搭載が想定されていた。

続いて 5 月に、用途に応じて ISP 部をプログラム可能なマッチ箱大の白黒カメラ・モジュール「Imputer」の発売が発表された。500 ポンド

で販売される開発システムを使って、顧客は自社の用途向けのプログラムを開発し、Imputer に搭載する。このころまでに社長に就任していた Denyer が、イメージセンサをビデオ会議や、人形の「眼」、リモコン飛行機のカメラなど様々な用途に拡張するために考えたシステムであった。主に品質管理検査カメラへの搭載が想定された一方、米国の自動車バックミラー大手 Donnelly Corporation が大口顧客になった²⁷。Donnelly は、アンチグレア・ミラーを制御するために Imputer を購入している。さらに同社は、VVL への 10% 出資と、貸付、自動車産業向けの製品開発を含む契約を 9 月までに結んでいる。VVL と Donnelly は 1991 年から、電子ミラー反射率をイメージセンサで制御する共同開発を続けてきた。Donnelly は、VVL が ST に買収される 1999 年には、所有割合 30% を超える株主になっていた。このように顧客が出資者・株主になって各用途向けの共同研究開発を行う構図は、後に見る米国の Photobit でも観察された。

さらに 10 月には、Microsoft Windows 3 上で動く PC 画像入力システム「VideoWizard」が発売された。小型ビデオカメラと、他社製の PC 拡張カード・ソフトで構成され、約 12 万画素 (350 × 350) の解像度で 256 階調グレースケールの画像が扱えた。1994 年には、機械エンジン・モニタリングの英 Icon Research が、イメージセンサの顧客に加わる一方、Microsoft Windows 3.1 や Windows for Pen 上で動く PCMCIA ベース、QVGA (312 × 287 画素) 解像度の PC 画像入力システムが発売された²⁸。

1995 年 4 月、VVL を事業子会社として設立された VISION Group が、ロンドン証券取引所に上場され、450 万ポンドが調達された²⁹。上場による調達資金は、債務返済と、Edinburgh 大学ヘロイヤリティを払うことがなくなるよう自社株を買うことに使われる一方、事業拡大のためにイメージセンサをカラー化する研究開発に投じられた。VVL は後に、Polaroid からカラーフィルタ及びマイクロレンズ技術のライセンス供与を受けている。この 1995 年には、警報システムの ASH に加えて、乳幼児モニター・システム、二次元バーコード認識、顧客数集計、

工場検査マシンビジョンへと顧客が多様化している。

1996年にVVLイメージセンサがカラー化されると、PCビデオ会議システムで大口の顧客をつかむようになる³⁰。1998年にかけてMattel、Tyco（1997年Mattelが買収）、Fisher-Price（1993年からMattel子会社）といった玩具大手からカメラ・モジュールを受注する一方、PCビデオ会議カメラではCreative Technology、Vivitar³¹、Rockwell Semiconductor Systemsといった大口のほか、Digicom S.p.A.、PMC Consumer Electronics（Pace）、Cubic VideoComm、Zoom Telephonicsなど新規顧客を増やした。1998年4月には、PCビデオ会議カメラ市場向けイメージセンサでVVLは世界シェア2位だったとも報じられている。またこの頃から、DSCの世界市場が離陸し始めており、VVLも米Sound Visionなどに80万画素（1000×800）解像度のCMOSイメージセンサを納入している。これは、VVLが初期から展開しているPPSではなく、CMOS APSであった。一方、ホームセキュリティ分野では、Response Electronics、Voltek Automation、Augur Industriesなど、英国内のホームセキュリティカメラ企業が顧客であった。1998年時点でのVVLの主要市場は、PCビデオ会議を筆頭に、DSC、ホームセキュリティであった。

VVLは、1998年11月に広い製品分野でのイメージセンサを、世界中に共同販売する契約をSiemensと締結した直後、12月にSTによる買収に合意している³²。買収は1999年4月に完了し、買収総額は、2330万ポンドであった。プレスリリースにおいて「半導体世界大手の資源とプレゼンスで、CMOSイメージセンサ技術を新たなイメージング市場へ活用する」ためであったとDenyerは説明している。STの1997年12月期の売上は約42億米ドル、営業利益は5.2億ドル、時価総額116億ドル弱、23か国に販売事務所があり、29000人が働く、世界で10番目に大きな半導体企業であった。これに対して、VVLの1998年7月期の売上は840万ポンド、税引き前営業損失が580万ポンド、米国2か所に販売事務所があり、全部で

85人が働いていた。

STはVVL買収を以ってCMOSイメージセンサ市場へ参入し、一時ほどの勢いはないものの、同市場のメイン・プレーヤーとしての地位を近年まで維持している。

VVLは、製造のほとんどを外部企業に委託して設計に特化するファブレス企業であった。同社は1990年の試作品から仏RoussetのEuropean Silicon Structures（ES2）をファウンドリとして利用していたが、1995年にはTSMCを利用するようになった³³。ただしカラーフィルタ工程については自社で投資・保有しており、その工場は「極東の下請け業者」内に設置していると報告している。おそらくファウンドリであるTSMCの敷地内もしくは近くに設置していたのではないだろうか。

4-3. OmniVision—シリコン・バレーからの中国市場開拓

VVLが上場した1995年には、その後のイメージセンサ市場のメイン・プレーヤーに連なる2つの企業が、設立されている。OmniVisionとPhotobitである。まずOmniVisionは、調査会社によって本格的にCMOSセンサ市場シェア集計が行われるようになった2003年以降、現在まで数量で2位以内、金額でも4位以内を維持してきた競争力のあるファブレス企業である。IVPやVVL、後述のPhotobitを含め、他のパイオニア企業の多くが比較的早期に既存企業による買収・イグジットを経験する一方、OmniVisionは2015年に中国政府投資会社を含む中国の投資コンソーシアムによる買収を受け入れるまで、自社成長を続けてきた。ただし、必要な技術を取得したり、事業を多角化したりするために、企業と特許の買収を行っている³⁴。自動焦点機構の省略を可能にするWavefront Coding技術を獲得するため³⁵、Colorado大学からスピノフしたCDM Opticsを2005年4月に買収している。映像プロジェクタのコンシューマ市場が立ち上がることを期待して、LCOS（Liquid Crystal On Si）型マイクロ液晶パネル開発の米Aurora Systemsを2010年3月に

買収している。また、ライセンス購入はしばしば行われるものの、まとまった取引として OmniVision は Kodak のイメージセンサ特許 850 個を 2011 年 3 月にまとめて購入している。

OmniVision は大学発ではないが、1995 年 5 月に米カリフォルニア州サニーバール市 (Sunnyvale) で創業されたベンチャー企業である³⁶。サニーバールは、サンフランシスコ湾岸地域 (ベイエリア) のいわゆる「シリコン・バレー」地域に存在する。ただし米企業で就業経験を持つ中国・台湾出身の 4 人によって設立されている。OmniVision の CEO Shaw Hong (洪筱英) は先立って 1988 年に近隣のサンタクララ市 (Santa Clara) で PC チップセット設計会社 HK Technology を創業しており、会長 (President) Raymond Wu (呉日正) は同社に勤務していた。Hong は上海出身の華人で、HK Technology の事業がうまくいかずほとんどの資金を失った後、OmniVision を創業したという³⁷。Hong は上海交通大学で電気工学士号を取得後、オレゴン州立大学で同修士号を取得している。Wu は、台湾の中原大学で電気工学士号を取得後、ウェイン州立大学で同修士号を取得している。Hong と Wu は、HK Technology に先立ってともに、Motorola でエンジニアとして就業していたという。これに Advanced Micro Devices 出身の Tai-Ching Shyu、National Semiconductor 出身の Datong Chen (陳大堂) という 2 人のエンジニアを加えた 4 人の創業であった³⁸。ただし、2 人のエンジニアは OmniVision が Nasdaq に上場する 2000 年に同社を退職している。

上場前の創業・運営資金提供者については詳らかではないが、OmniVision 上場時の目論見書 Form 424B4 によれば、1996 年 6 月から 1998 年 6 月までに 3 回の優先株発行が行われており、創業者・経営陣以外の大株主として台湾 Aucera Technology Group と、英国領トルトラ Kempten Limited、台湾 Powerchip Technology (PTC : 力晶科技) CEO Frank Huang (黄崇仁) が挙げられている。PTC は、セカンド・ソースとして OmniVision ファウンドリの一端を担うことになるが、前 2 社の詳細は不明である。

OmniVision 最初の製品は、1996 年 9 月に監

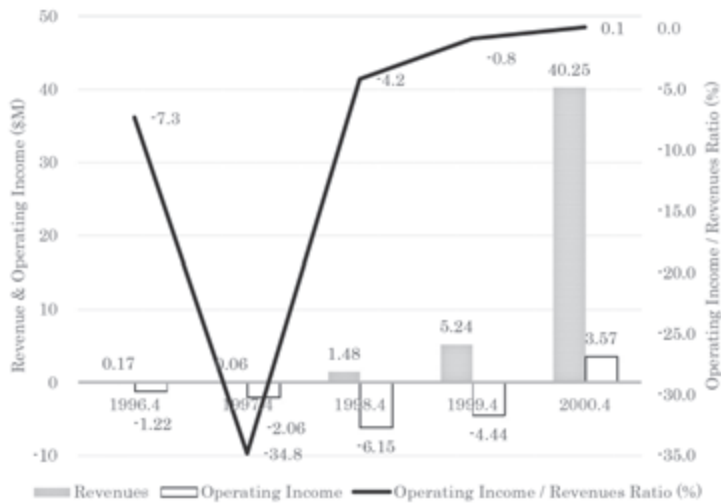
視カメラ・玩具向けに発売された白黒 1/3 インチ 7.2 万画素の PPS であった³⁹。米国製で初めてのワンチップカメラ (camera on a chip) であることが強調されていた。翌 1997 年 4 月には、PC ビデオ会議カメラと玩具・ゲーム機向けに、カラーで QVGA (320 × 240 画素) 解像度を持つ C3086 を発売した。この後、1998 年から 2000 年にかけて、マシンビジョンやバーコードリーダー、医療機器向けもあったものの、主に PC ビデオ会議カメラ、監視カメラ、トイ DSC 向けに、VGA (640 × 480 画素) 解像度クラスのカラー及び白黒イメージセンサを発売していった。

OmniVision はカラー化では VVL に 1 年遅れたものの、100 ドル以下のローエンド・PC ビデオ会議 (あるいは web カメラ) で、両社は 1990 年代末に強く競合していたという。2002 年後半頃からカメラフォンの市場が立ち上がり、本格的に CCD を代替し始める前の転換初期において、PC ビデオは CMOS イメージセンサにとって最大の市場で、監視カメラやトイ DSC がこれに続いてきた⁴⁰。

一方、後述の Photobit とは、CMOS APS の特許侵害について、2000 年前後から争うことになる。Photobit は APS 特許を持つカリフォルニア工科大学 (Caltech : California Institute of Technology) からライセンス供与権を受けており、OmniVision はこの時点でライセンスを受けていなかった。1999 年 3 月に、特許侵害について OmniVision に質問状が届き、2001 年 3 月には訴訟に発展、やがて Caltech に特許使用料を支払う。1996 年 9 月に PPS で CMOS イメージセンサ事業に参入した OmniVision は、1999 年 3 月までに APS 構造へ転換していたことになる。

OmniVision は図表 3 に示されるように、1998 年 4 月期から急成長し、営業黒字を達成した 2000 年の 7 月に、Nasdaq へ上場した。同社の上場目論見書と事業報告書によれば、こうした初期の成長は、少数の大口顧客への販売に多くを依存していた。たとえば 2000 年 4 月期の売上高のうち、Creative Technology (PC ビデオ・DSC) が 18%、米 Alaris (PC ビデオ・ト

図表 3. OmniVision の売上高及び営業損失推移



出所) 同社目論見書 Form 424B4 および事業報告書 10-K を参考に作成。横軸は会計年度。

イ/ゲーム) が 11%、販売代理店の台 World Peace Industrial Company (世平集団) (PC ビデオ・DSC・監視・全般) が 30% を占め、3 社合計で 6 割弱になる。売上高の 10% 以上を占めるには至らなかったものの、台 Viewquest Technologies (東莞能率科技) のような OEM 企業も主要顧客として挙げられている。Viewquest は、Intel と Mattel の合併事業 (IntelPlay Me2Cam) 向けや Microsoft 向けに PC ビデオカメラを製造しており、OmniVision がイメージセンサを納めていたという。

画像半導体の CMOS イメージセンサは、画質やサイズとして考慮される品質面でも、生産規模や歩留まりとして考慮されるコスト面でも、その製造プロセスが事業の重要なカギになる。OmniVision のイメージセンサ事業を製造面で支えたのは、主にメインのファウンドリ TSMC および両社の関係であった。OmniVision は、1996 年の最初の製品から現在までファウンドリとして TSMC を利用しており、最近では中国ファウンドリへのシフトが始まっているものの、20 年間もの長期にわたり密な関係を維持することでその市場地位を築き、イメージセンサ事業を成長させてきた。

OmniVision がつくりあげた CMOS イメージ

センサの生産体制は次のようになる⁴¹。シリコン基板に回路を作りこむ半導体製造の前工程は TSMC が主に、2000 年以降は PTC も少量を担当する。この体制は 2014 年 4 月期まで継続し、2015 年 4 月期には中国の HLMC (Huali Microelectronics: 華力微電子) と XMC (Wuhan Xinxin Semiconductor Manufacturing: 武漢新芯集成电路) が加わる。

半導体の中でもイメージセンサに特有なカラーフィルタ工程は当初、TSMC と PTC、凸版印刷が担当していたが、2005 年 4 月期からは大日本印刷と VisEra (采鈺科技)、2007 年 4 月期からは VisEra に一本化される。VisEra は、2003 年 10 月に TSMC と OmniVision がはじめた合併会社である⁴²。VisEra は、ウェハプローブ検査と呼ばれる工程と、レンズをウェハに直接つくりこむ CameraCube と呼ばれる製品の組み立ても 2007 年 4 月期から 2011 年 4 月期まで担当している。

後工程の組み立て (パッケージ封止) は当初、京セラと台 TEPC (Taiwan Electronic Packaging Company)、タイ Alphatec が行っていた。ただし 2004 年 4 月期から徐々に、台 Xintec (精材科技) や台 ImPac Technology (映像科技)、台 Tong Hsing Electronic Industries (同欣電子工業) など

に置き換わっていく。Xintec は、2003 年 4 月から OmniVision と VisEra が出資する企業である。OmniVision は 2003 年 6 月から ImPac に出資、2008 年までに投資比率を 25% 強まで高めたものの、2009 年 12 月 Tong Hsing が ImPac を買収した。その後、OmniVision は Tong Hsing に出資している。このほか、中 WLCSP (Wafer Level Chip Scale Packaging : 晶方半導体科技) にも 2007 年 5 月から出資しており、組み立ての一部を幾度か委託している。2011 年ごろまで中心となったのは OmniVision と、TSMC が間接的に出資する Xintec であった。

最終検査は当初、米国本社で行っていたものの、2000 年 10 月上海に Hua Wei Semiconductor (HWSC ; 2008 年から OmniVision Semiconductor (OSC)) という子会社を設立し、2004 年 4 月期には業務を移管している。

OmniVision の事業報告書によれば、同社の製造能力を高め、必要に応じてキャパシティを確保するために、TSMC と密接に協働してきた。ファウンドリにとって受注量が少ない場合、他の顧客が優先されることがあるし、仕様や歩留まりを要求通りみさせないことがありうるから、PTC をセカンド・ソースとして利用してきた。ファウンドリとは戦略的な関係にあり、OmniVision が設計問題に関する専門知識を提供し、TSMC がイメージセンサ生産事業を展開できるようにする⁴³。逆に TSMC は OmniVision に、イメージセンサの設計・生産の助けになる CMOS 半導体製造プロセスの専門知識を提供しているという。OmniVision は、2009 年に感度を大きく改善する BSI (Backside Side Illumination : 裏面照射) 型イメージセンサの市場導入に成功し、これが Apple の iPhone に 2009 年から 2010 年にかけて採用され、事業を伸ばすきっかけになる。しかし当時 BSI 型の製造は困難で、OmniVision と TSMC は密に協力しながらその歩留まり向上に努めている。後に他の顧客への製造サービスにも展開できるとはいえ、製造面での TSMC の貢献は大きかったであろう。ただし、TSMC は VVL はじめ 1990 年代から顧客を多様化しており、それぞれの顧客の製品が期待通りの画質・歩留まりで

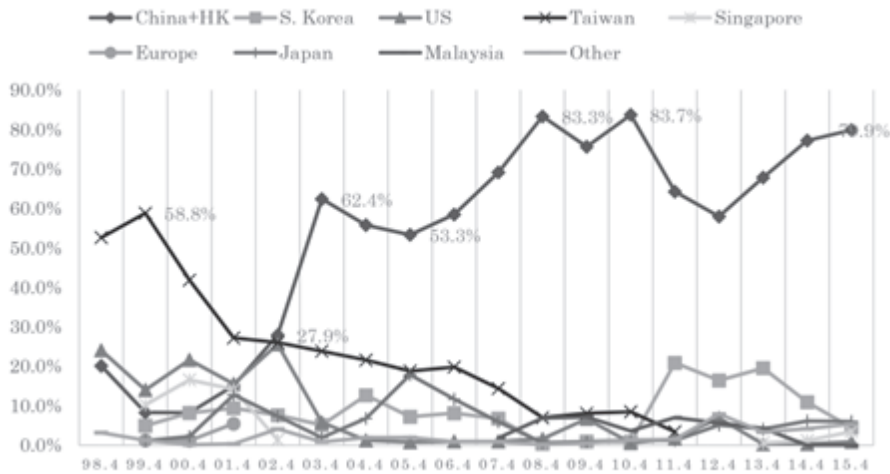
生産できるよう、また新たな微細化プロセスを適用できるよう、各企業と共同開発を進めている。これはこの業界のファウンドリの一般的な姿であったように思われる。

上場後、2000 年以降の OmniVision は、基本的に市場平均よりはカメラフォンに注力し、さらに成長著しい中国市場をメインに事業を展開していった。イメージセンサ市場に占めるカメラフォン用途の販売額シェアは 2005 年度で約 40%、2014 年度で 58% 弱とされている⁴⁴。OmniVision の売上高に占めるカメラフォン用途比率は、2006 年 4 月期に 75% (次点が DSC の 10%)、2015 年 4 月期に 68% (次点がゲーム機器 13%) であった。同社は、他に PC、車載、監視、医療機器など早期から用途の多角化をすすめたものの、大半をカメラフォンが占めていた。

OmniVision は、米国やほかのアジア地域でも事業を展開しており、主力のカメラフォンでは、Motorola や LG、Sony Ericsson 等に採用実績もある。しかし図表 4 に示されるように、2000 年前後までは電子機器 OEM が集中する台湾向けが多く、2002 年からはぶれを伴いながら中国市場が売上高の大部分を占めるようになる。中国市場の重視は、2000 年の目論見書ですでに述べられており、同年 12 月には最終検査工程のすべてを担うことになる OSC 建設が上海で開始されている。また、2008 年 4 月期には上海の研究施設 OmniVision Technology Center (OTC) を着工している。こうした事情を反映して、2007 年 4 月期には従業員 2064 人のうち、8 割に当たる 1600 人が中国に在籍している。ただし従業員は 2010 年 4 月期に全体で 1450 人、中国で 895 人まで減っており、その後は再び全体で 2176 人まで増加しているが内訳は公表されていない。また上記の通り、従来は TSMC とその合弁企業 VisEra や Xintec など台湾企業を中心とした生産体制であったが、最近は中国の HLMC と XMC がこれに加わった。

シリコン・バレーで米企業出身の華人達が創業し、中国を中心に主に低価格セグメントで大きく商売を伸ばした同社は、2016 年初めに中

図表 4. OmniVision 売上高に占める各国セグメントの割合推移



出所) 同社目論見書 Form 424B4 および事業報告書 10-K を参考に作成。1999 年以前の中国は Others に含まれる。

国政府投資会社を含む中国の投資コンソーシアムによって約 19 億米ドルで買収されることになった⁴⁵。コンソーシアムは Hua Capital Management (北京清芯華創投資管理) や、CITIC Capital Holdings (中国中信資本控股) とその子会社 GoldStone Investment (金石投資) から構成され、中国政府が自国の半導体産業育成を目指すプロジェクトの一環としての買収だったという見解が示されている⁴⁶。

5. 支配的設計の確立と普及—CMOS APS 発明と米産業界への拡散

5-1. JPL/Caltech における CMOS APS 研究開発

現在の CMOS イメージセンサの基本的な特徴は、汎用 CMOS プロセスで製造できることと、APS 構造を持つことであった。IVP や VVL、OmniVision が早期に事業化した CMOS イメージセンサは、露出制御などのカメラ機能をワンチップに集積した Camera-on-a-Chip のコンセプトを持ち、汎用 CMOS プロセスで製造されていたものの、当初は従来型の PPS であった。APS 構造の CMOS イメージセンサを発明

したのは、1995 年に Photobit を創業することになる Eric R. Fossum であった。CMOS APS が誕生したのは 1993 年、Caltech が運営する NASA (National Aeronautics and Space Administration: アメリカ航空宇宙局) の Jet Propulsion Laboratory (JPL: ジェット推進研究所) においてである。

JPL で CMOS APS が発明され、その事業化のために Photobit が創業されていくプロセスは、少なくとも 3 つの観点から大事な流れである。第 1 に、従来ノイズが多く画質に劣るとされた MOS 型イメージセンサが CCD に代わる技術的な可能性を示した。第 2 に、現在の ON Semiconductor に連なるメイン・プレーヤーの 1 つ Aptina を生んだ。そして何より第 3 に、産業界への技術移転や多数のスピンアウト、特許を基本とする知的財産権のパワー、政府のベンチャー企業育成プログラム、軍事技術の民間移転など、1990 年代から 2000 年代の米国のイノベーション・システム理解を助ける要素が詰まっている。漠然とオープン・イノベーション、シリコン・バレー発、大学発ベンチャーのコンセプトを頭に浮かべるよりも、社会的なイノベーション・システムのイメージをつかみやすい。ただし、Photobit は米国のベンチャー企業

が一般的に利用する、いわゆる VC を使わずに、創業・運営資金を調達していたことには注意が必要である。しかしこれも、同国で新興企業が誕生していく1つのパターンとして理解したい。以下では、CMOS APS の誕生とその波及、Photobit による事業化とその顛末について、1990年代から2000年代にかけての米国の状況をみていこう。OmniVision も2016年初まで米国を代表するイメージセンサ企業の1つであったが、JPL から Photobit への流れは米国産業界に強いインパクトと広がりを与えている。

1990年、Columbia University, Department of Electrical Engineering (コロンビア大学電気工学部) の準教授として CCD の研究をしていた Fossum は大学院生とともに、JPL へ合流する⁴⁷。当時、NASA の宇宙探査機ではイメージセンサとして CCD が採用されていたものの、宇宙用 CCD カメラはサイズも消費電力も大きかった。解像度が増すほど消費電力が増し、サイズが大きくなり、画像信号の転送が遅くなり、高速化しようとするればノイズが増えた。また CCD 方式の画像信号の転送は、宇宙で降り注ぐ放射線に弱く画質劣化が避けられなかった。一方、NASA 局長に1992年就任した Dan Goldin は「より速く、良く、安い」宇宙探査をその方針に定めた。JPL では、探査機のサイズやコストの低下が模索されるようになった。こうした背景が、Camera-on-a-Chip の CMOS APS 発明につながったという。電荷転送方式をやめて放射線被曝を避け、消費電力が少なく汎用の CMOS プロセスで製造してコストを落とし、信号処理回路を集積すればサイズが小さくなり部品が減ってコストも落ちる。Fossum は “Are CCD's Dinosaurs?” と副題を付けた1993年の CMOS APS 発表で、APS 構造とノイズ低減技術だけでなく、汎用 CMOS プロセスによるコスト低減と、低消費電力、Camera-on-a-Chip の実現を強調した⁴⁸。

ただし当初 CMOS APS の研究申請は JPL ではコストの問題で却下され、1993年4月に試作品ができるまで、ほぼ内密 “under the table” の研究開発だったという。そのため Fossum と共同発明者たちは、University of Southern

California (USC : 南カリフォルニア大学) の Information Sciences Institute (ISI : 情報科学研究所) が運営する安価な IC 試作サービス MOSIS (Metal Oxide Semiconductor Implementation Service) を利用するしかなかった⁴⁹。MOSIS は1981年、米政府の出資で設立された非営利組織で、各国にあるパートナーの工場で比較的少量から IC を製造する。1990年代初頭の米国では、Fossum らのチーム以外にも半導体分野の大学院生などが同サービスを利用して研究を進めることが一般的であった⁵⁰。当時、欧州にも1980年代前半から同様のサービスとして CMP (Circuits Multi Projets) があったものの、日本では基本的に1996年の VDEC (VLSI Design and Education Center) 設立までこうしたサービスはなかったという。また JPL 内部では CCD 開発チームとの間に部門対立 “camp conflict” が生じ、2000年代後半になってようやく NASA は CMOS イメージセンサを使い始めたという。1990年代の主流技術 CCD の専門家で占められていたイメージセンサ技術者コミュニティ、つまり学会でも当初の反応はおおむねネガティブだったという。ただし1995年頃から半導体のオリンピックともいわれる ISSCC (International Solid-State Circuits Conference) や IEDM (IEEE International Electron Devices Meeting) といった主要な国際学会の基調講演やディスカッションセッションで、CMOS イメージセンサと CCD の将来性が度々議論されるようになる⁵¹。

NASA 局長 Dan Goldin が当時掲げたもう一つの方針は、NASA で開発された技術を、米経済を強化するために産業界に移転することであった。この頃、電子画像事業は CCD もその主用途カムコーダも日本企業の独壇場であったため、CMOS APS の発明はこれを米国に取り戻す好機であると、Fossum らは米産業界に説いて回った。JPL からは、公式の Technology Cooperation Agreements (TCA : 技術協力協定)、Technology Affiliates Program (TAP : 技術提携プログラム)、非公式の技術協力、Photobit のスピンオフとその買収 (およびそこからのスピンアウト)、特許の所有者となった Caltech に

よるライセンス供与という5つの経路を通じて産業界への技術移転が行われた。

まずCMOS APSに興味を示し、JPLのTCAパートナーとなったのは、AT & TのBell Labsと、Kodak、National Semiconductor (NS:ナショナルセミコンダクタ)、Schick Technologiesであった。TCAでは、NASAがJPLの費用を負担し、パートナー企業は自社の費用を負担する。パートナー企業は、JPL職員と直接技術的なやり取りができ、特許ライセンスを優先的に受けられる。TAPのパートナーは、EG & G Reticonと、ITT (旧 International Telephone & Telegraph)であった。これ以外に「非公式の」技術協力が、PolaroidやIBM、HP、Rockwellとの間にあったという。

5-2. PhotobitのスピノフによるCMOS APS事業化

1995年Fossumを含む4人のJPL従業員は、彼の当時の妻Sabrina KemenyをCEOとして、Photobitを創立した。米国では1980年にBayh-Dole Act (Patent and Trademark Law Amendments Act: バイ・ドール条項、特許商標法修正条項)が施行されていたため、JPLで開発されたCMOS APS技術の特許は、運営主体のCaltechに帰属している。同技術のCaltechによる特許ライセンス供与を最初に受けたのがPhotobitで、Caltechは少数株主の1つにもなった。2001年にPhotobitがMicronに買収された際に、このライセンスはCaltechに戻ることになる。基本技術はCaltechからのライセンスだったが、実際の製品をつくるには多くの研究開発努力が必要で、コンシューマ製品、高速撮影、バイオ医療、車載用HDR (High Dynamic Range) 分野向けのイメージセンサ技術で、Photobitは100を超える特許を申請したという。

Caltechはその後も様々な主体に同技術をライセンス供与して収入を得る一方、1999年11月までに3つの基本特許 (broad patents) を成立させた後、精力的に特許権侵害訴訟を起こしている⁵²。2001年にOmniVisionとその顧客Creative Labsを訴えたのを皮切りに、2008年

にキヤノン、ソニー、ニコン、オリンパス、パナソニック、Samsung電子を提訴している。2010年はST、SETi、Siliconfile、東芝、Nokia、LG電子、Pantech、2012年はST、Nokia、Research In Motion (RIM)、2013年はOmniVisionを提訴している。

Photobitの事業資金は、サービス・製品の売上を除けば、米政府のSBIR (Small Business Innovation Research: 小企業革新研究) プログラムと、顧客からの出資によって賄われており、VCは利用されなかった。SBIRプログラムは1982年、Small Business Innovation Development Act (SBIDA: 小企業革新開発法) で、政府研究費を小企業に与えるために定められている。1億米ドル以上の研究開発予算をもつ米政府機関は同プログラムに参加し、外部委託研究予算の2.5%以上を小企業の研究助成に充てることになっている。小企業研究助成予算とすべき比率は2012年以降、3%程まで上昇している。Photobit以外にも、QualcommやSymantec、iRobot、Genentechなどのハイテク企業が同プログラムを利用している⁵³。

PhotobitのSBIRファンド契約は、創業翌年の1996年からMicronに買収される2001年にかけて、のべ29件、約646万ドルであった。内訳はNASAが16件、Department of Defense (DOD: 国防省) が13件である。DODには、Army (陸軍)、Air Force (空軍)、Navy (海軍)、Missile Defense Agency (MDA: ミサイル防衛局)、Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA: 国防高等研究計画局)、Defense Threat Reduction Agency (DTRA: 国防脅威削減局) が含まれる。60~75万ドルが7件、約38万ドルが1件、20件が10万ドル以下であった。Photobitはこれら政府機関向けに、軍事・宇宙用途のカスタム・イメージセンサ設計契約を結んでいた。その成果のいくつかは、民間向け製品に応用されている。

Photobitが1995年12月、Caltechから与えられたのはCMOS APSの全用途ライセンスであった。同社ではまず、それぞれの用途の商品を開発する他企業にライセンス供与することが主に計画された⁵⁴。これは各社へのカスタム・

イメージセンサ設計契約事業として展開された。JPL で行われた技術移転・協力のいくつかは、Photobit がスピノフされてからも、同社によるカスタム設計事業の顧客という関係の下に共同開発の形で進められた。1998 年に製品事業が開始されるまで、Kodak、Lucent、歯科 X 線センサの Schick Technologies や、自動車・産業用パワーマネジメント部品の Eaton などがカスタム品設計事業の顧客であった。

製品事業が開始される 1998 年からは、顧客に PC 会議カメラの Intel と Logitech、車載カメラの Gentex、検査機器・産業用マシンビジョンの Basler、医療用ピル・カメラの Given Imaging、カメラフォン向けカメラ・モジュールの日立、軍需機器の DRS Technologies、無線機器の Wireless Reading Systems ASA が加わることになる。これら顧客のうち、株式の 16% を所有し取締役を派遣した筆頭株主の Basler をはじめ、Schick、Intel、Gentex、日立が、Photobit に出資している。Schick は 1997 年、Basler は 1999 年に株式公開を果たしたばかりであり、Photobit の技術にアクセスすることで、競争優位の構築と事業拡大を目論んだ。Photobit にはこれ以外に、産業用マシンビジョン事業を営むオムロンや、販売代理店の 1 つだった丸紅ソリューション（現丸紅情報システムズ）を擁する丸紅が出資している。

1998 年 10 月、Photobit は PC ビデオ会議カメラ用に最初の製品、1/4 インチ 20 万画素 (512 × 384) 解像度の PB-159 を出荷し、製品事業を始めた⁵⁵。11 月にはマシンビジョンや放送局向けに、白黒 HDTV (High-definition television : ハイビジョン) (1280 × 720) 解像度で 60fps (frames per second) の、当時としては高速な PB-720 を発売している。製造の歩留まりが上がらず、苦勞したという。同社はファブレス企業で、Tower と TSMC、UMC の 3 つのファウンドリに製造を委託していた⁵⁶。ファウンドリとは 2 年間程度のプロセス共同開発の上、製造を委託していたという。

翌 1999 年には 3 つの新製品が発売される。1 月に PC ビデオ会議むけに 1/5 インチ CIF (352 × 288) 解像度の PB-100 と、1/3 インチ VGA

解像度の PB-300 が発売された。PB-100 は Logitech の PC ビデオ会議カメラヒット商品 QuickCam Express に採用される。また 100 万画素 (1024 × 1024) 解像度で 500fps と超高速な PB-1024 が Army との SBIR 契約でミサイル迎撃カメラ用に開発され、11 月までにマシンビジョン向けとして発売された。DARPA との SBIR 契約で開発された、白黒 QCIF (176 × 144) 解像度で 20fps の時計電池で駆動できる製品は、2000 年 Given Imaging のピル・カメラ M2A に採用された。マシンビジョン向けには 2000 年に、130 万画素解像度で 500fps と超高速な PV-MV13、2001 年に 400 万画素解像度で 240fps と高速高解像度の PV-MV40 が製品化された。

1999 年 10 月には来るカメラフォン向け事業が意識されるようになり、携帯電話の大手企業フィンランド Nokia とスウェーデン Ericsson が位置するスカンジナビア半島、オスロに欧州支社を開設した。

Photobit の売上は、1999 年に 400 万ドルに達し、2000 年は 2000 万ドルが見込まれた。しかし創業当初からのカスタム設計契約および医療・車載・産業用ニッチ品事業と、PC ビデオ会議カメラ向けのような標準製品事業は性質が異なっていた。このため、前者を 2000 年末、完全子会社 Photobit Technology Corporation (PBT) として社内でスピノフし、Fossum が CEO および会長を務めた。Photobit が開設した東京とオスロの設計センターは、PBT に吸収された。PBT は高収益であったが、売上高が 2500 万ドルとより大きな Photobit は、激しい競争による急激な価格低下で、利益が出ていなかった。

2001 年春の資金調達で、Intel や日立、Basler、オムロンから 256 万ドルの出資を受け、Photobit の手元資金には余裕があった。しかし、迫りくる半導体大手との競争や、エレクトロニクス・半導体市況の悪化から、創業者はじめ主要株主は、Micron への身売りを決めたという。ただし跡付けて考えれば、1999 年秋にはすでに同社への売却は検討されていた可能性がある。Micron 共同創業者の 1 人で 1994 年まで

CEO 兼会長だった Joe Parkinson が、1999 年 11 月に取締役として迎え入れられ、2000 年 7 月には Photobit の CEO に就任している。Parkinson の就任が Micron への売却を見越して行われたのか、逆に彼がいたから売却先の候補にあがったのか、必ずしも明らかでない。ただし Fossum によれば、Photobit が Micron に売却を持ちかけて応じるよう説得したという⁵⁷。Micron が手掛けていた DRAM と CMOS イメージセンサは製造プロセスが似ており、製造ラインの転用がきくことから Micron は応じたと思われる。

Micron は 2001 年 11 月、Photobit を買収してイメージセンサ事業に参入、2006 年までに数量でも金額でも市場の四分の一以上を占めてトップに立つ。しかし OmniVision、Samsung 電子の追撃を受けて業容を悪化させ、2008 年 3 月に同事業を Aptina Imaging としてスピンオフ、2009 年 6 月に投資会社 Riverwood Capital と TPG Capital に売却している。その後競争圧力の高いカメラフォン向けがほとんどの事業構成から、車載・産業機器市場向けに軸足を移し、これら市場での事業拡大を狙う ON Semi が 2014 年に同社を買収している。Micron、Aptina、ON Semi は、2016 年の現在までイメージセンサ市場のメイン・プレーヤーの一角であった。

Photobit が Micron に買収された際、あるいは数年してから創業した同社出身のイメージセンサ企業がある⁵⁸。どれもニッチ市場に特化した比較的小規模のファブレス企業である。まず 2001 年に Barmak Mansoorian と、Dan Van Blerkom が設立した Forza Silicon である。このうち Mansoorian は、University of California, San Diego (カリフォルニア大学サンディエゴ校) で博士号取得後、JPL に続いて 1995 年から Photobit に参加している。同社は Tower のほか、IBM や TSMC、UMC、ams、MagnaChip など様々なファウンドリを活用して、これまでマシンビジョンや車載カメラ、放送機器、軍事・医療向けカメラなどの用途に主に、超高感度イメージセンサのカスタム設計・製品事業を営んでいる。次に Alex Krymski が JPL と Photobit、Micron

を経て 2005 年に創業した Alexima である。Krymski は 2008 年にも、Photobit・Micron 出身の Lin Ping Ang と Luxima Technology を設立している。Alexima と Luxima はともに産業用マシンビジョンを中心に、放送機器、動作解析器、医療機器向けに、超高速イメージセンサのカスタム設計・製品事業を営んでいる。またオリンパスから一時 JPL に滞在し、2001 年から Photobit に参加した中村淳一が、Micron、Aptina を経て Brillnics を 2014 年に共同創業している。

(続く)

- ¹ カリフォルニア大学バークレー校 (University of California Berkeley) のセミナーや研究会、ミーティングにおいて、本研究に関する筆者の研究発表に、Henry Chesbrough 教授から様々なコメントとご議論をいただいた。ここに記して感謝したい。Chesbrough, Henry (2003) *Open Innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*, Harvard Business School Publishing: Boston, MA. (同名邦訳書、大前恵一朗訳、Sangyo Nohritsu Daigaku, Shuppanbu, 2004, p.8-10).
- ² 福島英史 (2016) オープン・イノベーション・ワールド探訪—概念の検討と画像半導体産業の揺籃期, *経営志林*, 53 (1) : 4 月.
- ³ 安藤隆男. “8 群 4 編 1 章 1-1 撮像デバイスの歴史.” *知識の森*. 電子情報通信学会. 25 Dec. 2011. Web. 20 Dec 2014.
- ⁴ 中村淳一 (2010) CMOS イメージセンサの黎明期とその後の発展, *映像情報メディア学会技術報告*, 34 (48) : 17-23.
- ⁵ 同社プレスリリース、2011 年 4 月 1 日。
- ⁶ 福島 (2016), 前掲論文.
- ⁷ Reines Edward R. Brian F. Ferguson. (2012) *Complainant California Institute of Technology's Reply to RIM Respondents' Submission in Response to Commission. United States International Trade Commission, Investigation No. 337-TA-DN 2895: Shore Chan DePumpo LLP.*
- ⁸ ResearchInChina (2015) *Global and China CCM (CMOS Camera Module) Industry Report, 2015,*

ResearchInChina.

- ⁹ 例えば日経エレクトロニクス、2015年1月5日。
- ¹⁰ Noble, P. J. (1968) Self-Scanned Silicon Image Detector Arrays, *IEEE Trans. Electron Devices*, 15 (4) : 202-209.
- ¹¹ Chamberlain, S. G. (1969) Photosensitivity and Scanning of Silicon Image Detector Array, *IEEE J. Solid-State Circuits*, 4(6) : 333-342.
- ¹² 中村 (2010) 前掲論文, p.17.
- ¹³ Johannessen, Mattias (2013) 3D Vision Sensing Technologies in Factory Automation and Robotics, *International Conference on Machine Vision Applications*, May 20-23, Kyoto, Japan. Clark, Warren (2011) A Global Player in Vision, *Imaging and Machine Vision Europe*, Dec. 2010/ Jan. 2011.
- ¹⁴ Robert Forchheimer は、1978年に Linköping 大学 Ingemar Ingemarsson 教授の下、他の2人の博士課程学生 (Viiveke Fåk および Rolf Blom) とともに医療機器メーカー Sectra AB も共同創業している。
- ¹⁵ Jones-Evans, Dylan & Magnus Klostén (1997) Universities and Local Economic Development : the Case of Linköping, *European Planning Studies*, 5 (1) : 77-93.
- ¹⁶ OECD (2002) *Learning to Innovate : Learning regions*, Carlos Román del Río Ed., OECD.
- ¹⁷ Chen, K. M. Afghani, P. E. Danielsson, & C. Svensson. 1990. PASIC : A processor-A/D converter-sensor integrated circuit, *Proc. IEEE ISCAS*, 3 : 1705-1708.
- ¹⁸ ただしスコットランドでは1940年代から海外企業の進出が続き、ハイテク企業が集積する「シリコン・グレン」(Silicon Glen) が形成されたことが知られている。これには政策的な誘致が寄与している。McCalman, J (1992) Setting up in Silicon Glen : inward investment and implications for spin-off and supplier linkages, *Environment and Planning C: Government and Policy*, 10 : 423-38. また Scottish Enterprise (SE : スコットランド開発公社) は「Innovation Centres プロジェクト」と呼ばれるベンチャー企業育成プログラムを実施している。
- ¹⁹ Edinburgh Research and Innovation Limited (2010) *University of Edinburgh Celebrating 40 years of innovation*, University of Edinburgh.
- ²⁰ 四半期決算では、1996年10月31日(1997年度第1四半期)に約6.8万ポンドの税引き前経常黒字を達成している。
- ²¹ Renshaw, D. P. B. Denyer. G. Wang. M. Lu. 1990. ASIC image sensors, *Proc. IEEE ISCAS* : 3038-3041.
- ²² Edinburgh 大学 ERI (Edinburgh Research and Innovation) ニュースリリース、2008年7月30日。
- ²³ Independent On Sunday、1994年11月20日。
- ²⁴ The Guardian、1991年1月16日。Electronics Times、1991年3月21日。The Engineer、1992年11月19日。Financial Times、1994年8月10日。The Times、1994年10月5日。Electronics Times、1998年10月19日。Scotland on Sunday、1998年3月29日。
- ²⁵ Financial Times、1991年1月18日。The Independent - London、1992年3月30日。
- ²⁶ Electronics Times、1993年1月28日 ; 1993年9月9日。The Herald、1993年5月27日。Financial Times、1993年6月17日。The Guardian、1993年10月14日。The Independent - London、1993年2月11日。
- ²⁷ Magna Mirrors が2002年、Donnelly を買収している。
- ²⁸ The Herald、1994年3月17日。Electronics Times、1994年9月8日。
- ²⁹ The Scotsman、1995年4月6日。The Herald、1995年3月13日。PR Newswire Europe、1998年5月6日。Electronics Times、1995年4月13日。
- ³⁰ Regulatory News Service、1996年1月9日 ; 1996年1月22日 ; 1996年4月19日 ; 1997年3月20日 ; 1998年3月26日 ; 1998年4月6日。Reuters News、1996年1月9日。Electronics Times、1996年1月18日。Electronic Engineering Times、1998年2月25日。
- ³¹ Vivitar は、1995年にリコーが1.79億ポンドで買収した英 Gestetner Holdings の一部であった。Vivitar は、1996年9月に Gestetner がプラザクリエイイトに売却、さらに2006年11月に Syntax-Brilliant Corporation、2008年8月 Sakar International に売却され、現在に至る。
- ³² Reuters News、1998年11月10日 08 : 08 午前 GMT ; 1998年12月22日 07 : 01 午後 GMT。Regulatory News Service、1998年12月22日。
- ³³ Renshaw et al. (1990). Financial Times、1993年6月17日。Electronics Times、1995年4月13日。

Regulatory News Service、1997年10月16日。1985年創業のES2は、OlivettiやSaab、British Aerospace、Philips等の大企業が出資したことで注目を集めたが、1995年4月にMCU/フラッシュを製造する米Atmelに買収された。AtmelのRousset工場は2010年に、独LFoundryに売却された。LFoundryは2013年12月、同工場の破産申請を行い、2014年6月の入札でブラジル半導体メーカーSix Semiconductoresが1800万ユーロで落札した。同社は、LFoundry Roussetの製造設備をブラジルに移設するという(Clarke, Peter. "Brazil Wins in LFoundry Rousset Sell-Off." EE Times. UBM. 20 June 2014. Web. 14 Nov. 2015.)。

³⁴ 同社 Form 10-K(事業報告書)。JP Morgan Investor Conference、2005年5月19日。Opto & Laser Europe、2004年12月号。

³⁵ 同技術は、被写界深度を拡大する。カメラでピントが合っているように見える範囲の浅深を、被写界深度という。

³⁶ 同社 Form 424B4(目論見書)。

³⁷ The Edge Singapore、2004年5月31日。

³⁸ Chenは、中国精華大学で博士号を取得した後、Stanford大学ポスドクを経て、National Semiconductorに入社している。OmniVision退職後は、上海で携帯電話向けSoCのSpreadtrum Communications(展訊通信)を共同創業している。"Datong Chen WestSummit Capital." *WestSummit Capital*. n.d. Web. 10 Dec. 2015.。Shyuの出自は未確認。

³⁹ Business Wire、1996年9月9日;1998年10月19日;1998年11月16日;2000年2月8日。Computer Business Review、1996年9月18日。M2 Presswire、1997年3月11日。Electronic News、1997年6月9日。Reuters News、2000年3月8日。

⁴⁰ 日本経済新聞社、日経マーケット・アクセス・レポート各号。Techno System Research集計。

⁴¹ CMOSイメージセンサとUSB等のインタフェース・チップやDSPは、当初Samsung電子が製造していたが、2004年4月期にTSMCとUMC、SMIC三社に切り替わり、2009年4月期からはTSMCに一本化されている。

⁴² OmniVisionはPTCとも2004年に合弁会社Silicon Optonics(SOI:晶相光電)をつくって旧製品の販売

をゆだねていたが、2011年1月にSOI株持ち分を処分している。

⁴³ TSMCでVice President of Quality and ReliabilityをとりとめたDr. John T. Yueが、2005年～2010年にOmniVisionで同じ役職に就いている。

⁴⁴ Siliconfile事業報告書。Techno System Research集計にもとづく。

⁴⁵ 同社ニュースリリース、2016年1月28日。

⁴⁶ 例えばBrowning, Jonathan. "China Wants What's in Your Phone as Chips Replace Oil." Bloomberg Business. Bloomberg. 3 Dec 2014. Web. 7 June 2015. EMSOneニュース、2014年8月19日。

⁴⁷ FossumはWebサイトで出自や取得特許と、CMOS APSやPhotobitにまつわる刊行物のコピーを掲載している。Fossum, Eric. "Website of Eric R. Fossum." *Fossum*. n.d. Web. 10 June 2014. 彼はまた学会や大学で自身の経験を講演しており、筆者が2014年から2016年までVisiting Scholarとして滞在しているUniversity of California Berkeleyでも幸運なことに2015年9月9日に講演があった。Fossum E. R. (2015) The Big Picture : CMOS Image Sensors From Zero to Billions and Beyond. *EECS Colloquium, University of California Berkeley*, September 9. この他にCMOS APS発明とPhotobit創業の経緯について、以下が詳しい。Fossum E. R. (2013) Camera-on-a-Chip : Technology Transfer From Saturn to Your Cell Phone, *Technology and Innovation*, 15 : 197–209. Fossum E. R. (1995) *CMOS Active Pixel Sensor (APS) FY'95 Technical Progress Report*, JPL Internal Presentation, November 29. Connell, D. (2006) *Secrets of the World's Largest See Capital Fund : How the United States Government Uses its Small Business Innovation Research (SBIR) Programme and Procurement Budgets to Support Small Technology Firms*, Centre for Business Research, University of Cambridge.

⁴⁸ Fossum, E. R. (1993) Active pixel sensors—Are CCD's dinosaurs? *Proc. SPIE*, 1900 : 2–14.

⁴⁹ MOSISは、企業や大学、研究機関が利用してコストをシェアする、マルチ・プロジェクト・ウェハース(MPW : Multi-Project Wafers)で1981年から運用されている。

⁵⁰ 中村(2010)。中村は1990年代前半にVisiting

Scholar として JPL に滞在しており、こうした IC 試作サービスの有無、延いては産業界に人材を送り込む大学・大学院での実用的な IC 設計教育の遅れが、CMOS イメージセンサへの主流技術転換プロセスで日本企業が出遅れた理由の一つであると考えている。

- ⁵¹ IEEE Solid-State Circuits Technology Workshop on CMOS Imaging Technology, ISSCC 1996. Photons to Bits, Discussion Session, ISSCC 1996. Will CMOS Image Sensors Survive Scaling ? Discussion Session, ISSCC 1998.
- ⁵² U.S. Patent #5,990,506; #5,471,515; #5,841,126. Farnan LLP (2013) *Complaint for Patent Infringement*, September 20, Farnan LLP. Cherney, Mike. "Caltech, Canon Settle Camera Imaging Patent Dispute." *Law360*. Portfolio Media. 10 Nov. 2009. Web. 1 Jan 2016. Leonhardt, Megan. "Nokia, RIM, STMicro Face ITC Probe Over Caltech Sensor IP." *Law360*. Portfolio Media. 4 June 2012. Web. 8 Jan 2016.
- ⁵³ SBIR プログラムの内容と採択実績を次で確認。U. S. Small Business Administration. "SBIR.gov." SBA. n.d. Web. 18 Dec. 2015.
- ⁵⁴ Federal Technology Report, 1997 年 7 月 31 日。PR Newswire, 1998 年 10 月 6 日。Los Angeles Business Journal, 2001 年 3 月 12 日。Birmingham Post, 2002 年 10 月 8 日。EE Times, 2000 年 8 月 28 日。Business Wire, 2001 年 6 月 11 日。
- ⁵⁵ Business Wire, 1999 年 1 月 12 日; 1999 年 2 月 17 日; 1999 年 8 月 16 日。Financial Times, 1999 年 10 月 12 日。
- ⁵⁶ EE Times, 1999 年 1 月 25 日; 2000 年 11 月 20 日; 2001 年 1 月 8 日。
- ⁵⁷ Fossum, Eric. "Comment on Rockchip to Enter Image Sensor Market?" *Image Sensors World*. Vladimir Koifman. 13 Nov. 2014. Web. 20 June 2015. 同サイトはイスラエルでイメージセンサ設計事業を営む Analog Value の CTO Vladimir Koifman が運営し、現役のエンジニア・学会関係者がコメントを残すことで知られる。
- ⁵⁸ San Gabriel Valley Tribune, 2006 年 12 月 13 日。UAE Government News, 2013 年 11 月 13 日。Theuwissen, Albert J. P., Eric R. Fossum & Boyd Fowler et al. (2016) Introduction to the Special Issue

on Solid-State Sensors, *IEEE Trans. Electron. Devices*, 63 (1) : 5-9. "Management Team." Forza Silicon. n.d. Web. 7 Feb. 2016. "About Us." Alexima. n.d. Web. 7 Feb. 2016. "About Us." Luxima Technology. n.d. Web. 7 Feb. 2016.

