

一橋大学 GCOE プログラム
「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」
大河内賞ケース研究プロジェクト

三菱電機
人工網膜チップの開発と事業化

小室匡史
江藤学

2011 年 9 月

CASE#11-03

本ケースは、一橋大学グローバルCOEプログラム「日本企業のイノベーション—実証経営学の教育研究拠点」から経費の支給を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果のひとつである。このプロジェクトは、大河内賞を受賞した業績について事例分析を行うもので、(財)大河内記念会と受賞企業のご協力をえながら、技術革新の概要やその開発過程、事業化の経緯や成果などを分析している。事例研究を積み重ねて、日本の主要なイノベーションのケース・データを蓄積するとともに、ケース横断的な比較分析を行い、日本企業のイノベーション活動の特徴や課題を探り出すことを目指している。なお、本プロジェクトを進めるに際して、(財)大河内記念会より多大なご支援・ご協力をいただいております。心よりお礼を申し上げます。
(プロジェクト活動の詳細については [http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize\(A\).html](http://www.iir.hit-u.ac.jp/iir-w3/research/GCOEokochiprize(A).html) を参照のこと)。

※本ケースの著作権は、筆者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本ケースに含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【連絡先】 一橋大学イノベーション研究センター研究支援室

TEL:042-580-8423 e-mail:chosa@iir.hit-u.ac.jp

一橋大学 GCOE 大河内賞ケース研究プロジェクト
三菱電機株式会社: 人工網膜チップの開発と事業化¹

2011年09月02日

一橋大学大学院商学研究科経営学修士コース MBA プログラム修了* 小室匡史†
一橋大学イノベーション研究センター教授* 江藤学‡

*2011年03月当時

†コムロコンサルティンググループ代表
〒151-0053 東京都渋谷区代々木1-30-15
ceo@komurocg.com

‡日本貿易振興機構ジュネーブ事務所長
80, rue de Lausanne, 1202 Genève SWITZERLAND

¹ 本ケースは、一橋大学グローバル COE プログラム「日本企業のイノベーション:実証的経営学の教育研究拠点」からの経費を受けて進められている、「大河内賞ケース研究プロジェクト」の研究成果の1つである。ケースの作成にあたっては、以下の方々から多大なご支援をいただいた。ここで改めて、心から感謝を申し上げたい。

三菱電機株式会社[2011年04月01日時点の職位を掲載]
執行役副社長 半導体・デバイス事業本部長 工学博士 久間和生氏
先端技術総合研究所所長 田中健一氏

1. はじめに

本ケースでは、三菱電機株式会社（以下、三菱電機）における人工網膜 LSI（本ケース内では三菱電機の人工網膜チップの名称を“人工網膜 LSI”と表現）の開発と事業化について記述する。日本の総合電機メーカーである三菱電機は、売上高で株式会社日立製作所（以下、日立製作所）、株式会社東芝（以下、東芝）に次ぐ業界 3 位（2011 年 03 月期：3,645,331 百万円）[1]である。三菱電機は、家電から重電、人工衛星に至るまで B to B¹・B to C²の両分野で数多くの製品を販売している。近年の三菱電機は、日立製作所・東芝両社の業績低迷が報じられる中で携帯電話や洗濯機等の不採算事業を大胆に整理しファクトリーオートメーション機器等の事業に経営資源を集中した結果、事業の「選択と集中」に成功し業績を伸ばしている。2006 年 11 月 02 日にはバブル崩壊後初めて三菱電機の時価総額が総合電機売上高最大手の日立製作所を上回った。三菱電機の主要な沿革は、下記の通りである[1,2].

1921 年：三菱造船（株）電機製作所を母体に三菱電機（株）を設立

1935 年：三菱神戸病院にエレベーター1号機を納入

1937 年：東京株式取引所に株式上場

1966 年：日本初の人工衛星を開発し、TRW 社から受注しインテルサット III 号へ搭載

1980 年：昭和 54 年度売上 1 兆 754 億円で 1 兆円企業に到達

また、本ケースのメインテーマである人工網膜 LSI[3]とは「並列情報処理に有利な光と、人間の脳神経の機能を模倣したニューラルネットワーク³を融合した基礎研究の結果開発された半導体集積回路。人間の眼のようにモノの形状の認識に必要な特徴量を、瞬時に検出する高度な画像処理機能をもつ画像センサ」[4]のことである。三菱電機でおこなわれた人工網膜 LSI の研究は、その後の CMOS⁵センサ市場を支える原動力となった。本ケースでは、人工網膜 LSI の開発と事業化を以下の 4 つの段階に分けて解説する。

¹ B to B (Business to Business)：企業間の取引。

² B to C (Business to Consumer)：企業と一般消費者の取引。

³ ニューラルネットワーク（ワーク）[4]：人間の神経回路網を参考にした情報処理技術であり、生物の神経回路網を模倣して、たくさんの神経細胞とシナプスと呼ばれる基本素子が相互接続されたネットワーク。単純な信号をやりとりすることで複雑な情報処理をおこない、処理の並列性、記憶の分散性、学習機能の特徴とする。実現するためには、脳の情報処理様式の理論モデルと、デバイスやシステムなどハードウェアの開発が必要となる。

⁴ ニューラルネットワーク（Neural Network）[4]：生物の神経回路網を模倣して、たくさんの神経細胞とシナプスとよばれる基本素子が相互接続されたネットワーク。単純な信号をやりとりすることで複雑な情報処理をおこなう。

⁵ CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) [4]：相補型金属酸化膜半導体 (MOS) の総称。小型、高集積化、低消費電力に適した、現在主流の IC (Integrated Circuit) 製造技術。n チャンネル型と、p チャンネル型の MOS トランジスタを組み合わせた構造で、それぞれのトランジスタの間で、キャリアが相補的に動作する。

- 第1段階：光ニューロチップ開発
- 第2段階：人工網膜 LSI 開発
- 第3段階：人工網膜 LSI 事業化と新規市場開拓
- 第4段階：ルネサス分社

これらをより詳細に時系列で整理すると下記のようなになる[5].

- 1986年：光連想メモリ⁶の概念創出と光並列処理技術
- 1988年：光ニューロコンピューターを実現する
キーデバイスである光ニューロチップの開発
- 1989年：光ニューロチップ⁷の機能実証 (GaAs)
光ベクトル・マトリックス乗算器，感度可変受光素子⁸
- 1992年：人工網膜 LSI の開発
- 1992年：人工網膜 LSI の機能実証 (GaAs)
- 1994年：シリコン人工網膜 LSI の開発 (CMOS プロセス)
- 1996年：人工網膜 LSI を応用したジェスチャー入力形インタラクティブゲームの開発
- 1998年：人工網膜 LSI (白黒版) の量産開始
- 2000年：人工網膜 LSI (カラー版) の量産開始，システム LSI 化
⇒ 携帯電話，PDA，ゲーム，セキュリティ，交通，指紋
照合などの応用分野で実用化
- 2003年：三菱電機システム LSI 事業部門をルネサス (当時：ルネサス テクノロジ株式会社，現：ルネサス エレクトロニクス株式会社，以下，ルネサス) に分社化
⇒ 以降，ハードウェア (LSI) はルネサスにて事業を継続，
画像認識応用アルゴリズムは三菱電機にて開発，現在に至る

⁶ 光連想メモリ (Optical Association Memory) [4]：ホログラフィーを使った画像連想メモリ。光増幅器と位相共役ミラーでつくった光共振器の中に画像情報を記録したホログラフィーを入れ，不完全な画像情報をシーズ光として入力すると，発信光の空間パターンとして，「連想ゲーム」のように，もとの完全な画像情報が読みだせる。

⁷ 光ニューロチップ (Optical Neurochip) [4]：光のもつ三次元空間並列性を使って，人間の脳と同じ三次元神経回路を再現したもの。ガリウム砒素基板上に LED (Light Emitting Diode：発光ダイオード) の一次元アレイ (Array：配列) と感度可変受光素子の二次元アレイを層上構造にして集積化した，新しい三次元光電子集積回路。これによって，神経回路網の基本演算であるベクトルと行列との積和を完全並列で，しかも高速演算することができるようになった。

⁸ 感度可変受光素子 (VSPD：Variable Sensitivity Photo Detector) [4]：光を電気に変換する効率を外部からの制御電圧等で可変にできる受光素子。例えば金属・半導体・金属の三層の素子構造で作製される。半導体部分に制御電圧を加えながら光を照射すると，薄膜の電気特性が変化して，受光感度を変えることができ，さらにその受光感度を半導体と金属の界面準位に記憶できる。

本ケースでは、人工網膜 LSI の開発と事業化の全ての段階に於いて直接リーダーとして携わった久間和生氏⁹（以下、久間氏）の意思決定を中心に人工網膜 LSI のイノベーション過程について記述する。久間氏のグループは、光ファイバーセンサ¹⁰を世界に先駆けて開発し、世界初の光ニューロチップの試作に成功した。その後、人工網膜 LSI を開発し、実用化に成功した。開発された人工網膜 LSI の基本構造を示すと図 1 となる。

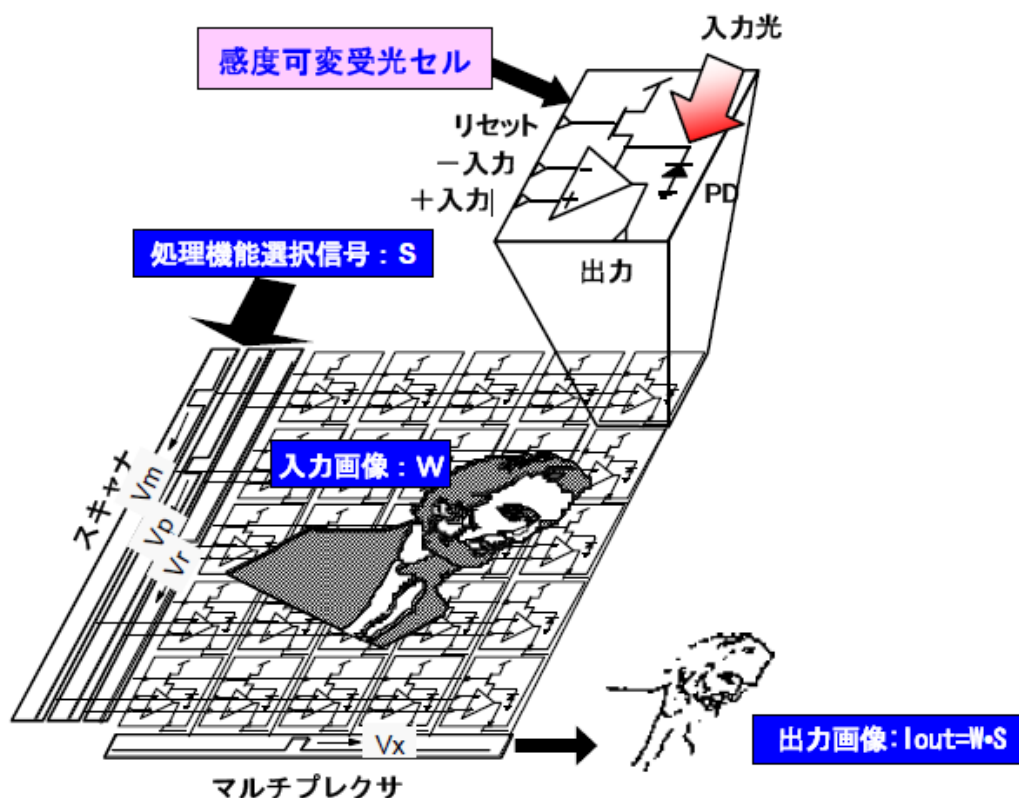


図 1：人工網膜 LSI の基本構造[5]

人工網膜 LSI 事業は、三菱電機の長い歴史から見ても極めて革新的な事業であった。具体的には、久間氏を中心とした研究所のメンバーが研究開発から販売までの全ての工程を主体的におこなったという点が挙げられる。即ち、光ニューロチップの基礎研究、人工網膜 LSI 開発への応用研究、人工網膜 LSI 事業化と新規市場開拓の全ての段階を研究所出身者が中心におこなったのである。当初は、数名のメンバーから始まり、大きな事業へと成長させていった。人工網膜 LSI 事業の生みの親とも言える久間氏は、研究所でグループマネージャーになった段階から、人工網膜 LSI 事業に携わる大半のメンバーを自ら一人ひとり集めていった。人工網膜 LSI 事業は、専門性の高いプロフェッショナルである個々人が自律分散的に協働する組織となったことで大きな成果をあげることができた。

⁹ 久間和生氏：三菱電機株式会社 執行役副社長 半導体・デバイス事業本部長 工学博士 【2011年04月01日時点】。

¹⁰ 光ファイバーセンサ (Optical Fiber Sensor) [4]：光ファイバーをセンサエレメント、あるいは計測信号の伝送路に用いた光学式センサ。絶縁性、無誘導特性に優れている。また、計測対象により光の位相を変調するセンサは超高感度である。

次に、人工網膜 LSI をイメージセンサ事業という観点から見ていく。人工網膜 LSI はイメージセンサの一種としてみることもできるが、三菱電機では人工網膜 LSI よりも前にイメージセンサ事業を展開していた時期があった。デジタルカメラ発展期のイメージセンサの中心的デバイス¹¹であった CCD イメージセンサ¹²（以下、CCD）である。三菱電機は、人工網膜 LSI 事業の研究開発段階より前に CCD 事業を撤退していた。久間氏は撤退理由を「カメラに利用できるレベルまでノイズを減らすのに多大な開発リソースが必要な上、当時の半導体の主流であったメモリなどとは別の設備投資が必要であったため」[6]と述べている。人工網膜 LSI は CCD 事業のリベンジではなく、全く独自の経路で上がってきた。実際、人工網膜 LSI の開発時には、三菱電機で過去に CCD を担当していた部隊から人がくるということも一切なかった。三菱電機が CCD 事業を撤退したにも関わらず、人工網膜 LSI の研究を続けることができた理由としては、CMOS¹³イメージセンサ（以下、CMOS）を利用したことが大きな要因であった。具体的には、CCD は CMOS とは違うプロセス（設備投資が別途必要であった）であったのに対し、人工網膜 LSI は CMOS を採用したことから既存の設備（DRAM¹⁴等のライン）を用いた製造が可能であった。久間氏は、このことが「半導体から見た場合に人工網膜 LSI 事業を開始した最大の理由であった」[6]と述べている。

とはいえ、CCD 事業を撤退していたことは、人工網膜 LSI 事業をより困難なものにした。久間氏は、「CCD をやっていなかったということが我々にとって物凄く苦しかった」[6]と述べている。イメージセンサは、ノイズ・感度との戦いである。久間氏は、「CMOS センサと CCD はノイズとの戦いという点において、共通点が多かった。CCD のノウハウを知っているメーカーの方が CMOS センサをやり易い。」[6]と述べている。現状、国内の状況から見ると、CCD・CMOS 事業で最後まで残ったのが、ソニー株式会社（以下、SONY）とパナソニック株式会社（以下、Panasonic）であった。CMOS センサ事業には、アメリカ合衆国に本社を置くマイクロン・テクノロジー（Micron Technology, Inc., 現在は同社の CMOS 事業の売却により Aptina Imaging Corporation[株式非公開企業]として独立）やオムニビジョン（OmniVision Technologies, Inc.）、大韓民国に本社を置くサムスン電子（Samsung Electronics Co., Ltd.）等が業界に参入した。現在のイメージセンサ市場は、台湾を中心としたアジアのメーカーが低価格量産路線、日本のメーカーが高価格高品質路線で生産している。

人工網膜 LSI の事例は、研究所のメンバーが基礎研究、応用研究、生産・販売までおこなったという点で極めて革新的と言える。本ケースでは、主に久間氏的意思決定を中心にイノベーションの源泉が何であり、どのように起こっていったのかを見ていきたい。

¹¹ デバイス（Device）[4]：電気回路を構成する基本的な素子。トランジスタや IC など。

¹² CCD イメージセンサ（Charge Coupled Device Image Sensor）：電荷結合素子（CCD）を利用した固体撮像素子によるイメージセンサ。

¹³ CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor）：相補性金属酸化膜半導体。

¹⁴ DRAM（Dynamic Random Access Memory）：半導体記憶素子の一つであり、コンデンサに電荷を蓄えることによりビットを記憶させるタイプのメモリ。

2. 光ニューロチップ開発への道

光ニューロチップ開発の発端は、久間氏がカリフォルニア工科大学に客員研究員として留学した時代の1985年から1986年に遡る。当時、久間氏は量子光エレクトロニクス、DFB¹⁵半導体レーザーのパイオニア的研究者のひとりである Amnon Yariv (アムノン・ヤリフ) 教授の研究室に所属していた。既に、半導体レーザー¹⁶の主要な研究はかなり進んでいた。久間氏は、自ら新しいことをやりたいという思いから、非線形光学¹⁷に注目した。久間氏は、非線形光学の研究をしている過程で、光連想メモリ (EX. 顔の半分を見れば顔の全体が出てくる。A という文字を出せば、B, C, D と出てくる) システムを開発しようと考えた。

久間氏が光連想メモリの研究をしていた時代と時を同じくして、米国で John Joseph Hopfield (ジョン・ホップフィールド) によるニューラルネットワークモデルの研究 (EX. ホップフィールド・モデル¹⁸) が注目を浴びていた。ホップフィールド自身は、1982 年に「連想型ニューラルネットワーク」[7]を發明している。ホップフィールド・モデルに基づくネットワークは、「ユニットであるニューロン間に対称的な相互作用がある非同期型ネットワーク」に基づいており、自然な操作によってネットワークのエネルギーが極小値をとるという特徴がある。久間氏は、ホップフィールド・モデルを光情報処理に応用できるのではないかと考えた。久間氏には、大学時代から“脳を理論的にモデル化したい” [6]という思いがあった。ニューラルネットワークは、人間の脳を模倣したもので超並列処理方式の情報処理理論を用いた生体の脳のモデル化である。そこで、並列プロセッサに適した光技術とニューラルネットワークを融合した光ニューラルネットワークに注目した。当時、久間氏は「光の三次元空間並列性を使えば、人間の脳の構造と同じような、超並列・超高速の神経回路ができるだろう」[8]と考えていた。

久間氏は、帰国後に光ニューラルネットワークの研究を始めた。定盤の上で処理しているものをチップ化しようと考えたのである。そこで、久間氏らはガリウム砒素の基板の上に、発光ダイオードのアレイ (規則正しく並んだ配列) と受光素子のアレイを配列し、その二

¹⁵ DFB (Distributed FeedBack : 分布帰還型) [4] : 共振器の反射鏡のかわりに、素子内に分布帰還型の鏡として回折格子を形成させた構造のレーザーを DFB レーザーと呼ぶ。発振スペクトルの純度が高いという特徴がある。

¹⁶ 半導体レーザー (Semiconductor laser) [4] : 半導体の pn 接合を利用したレーザー。固体レーザーや気体レーザーに比べてはるかに小型、高効率で、信頼性がある。流す電流によって出力光を高速に直接変調できる。

¹⁷ 非線形光学 (Nonlinear optics) [4] : 光に対する物質の非線形応答現象を研究する分野。光の電界強度に比例しない電気分極によって起こる光学現象が対象となる。例としてレーザー発振や光混合、光の高調波発生などがある。

¹⁸ ホップフィールド・モデル (Hopfield Model) [4] : 脳の神経回路網のモデルのひとつで、対称結合したニューロンが興奮しているかどうかを磁性体の原子が相互作用し合うスピンガラスモデルと関連づけたもの。組み合わせ最適化問題や連想メモリへの応用が期待されている。

つのアレイ間に空間光変調素子¹⁹を挟み込んで試作チップをつくった[8]。こうして1988年に誕生したのが、世界初の光ニューロチップである。光ニューロチップとは、「光のもつ三次元空間並列性を使って、人間の脳と同じ三次元神経回路を再現したもの」[4]である。

人間の脳は、三次元の神経回路網であるニューラルネットワークで構成されており、約140億個の神経細胞であるニューロンが記憶素子であるシナプスを介して相互に繋がっている。当時、久間氏は、「シナプス結合の数は膨大すぎるので、基本的に二次元回路であるシリコン²⁰

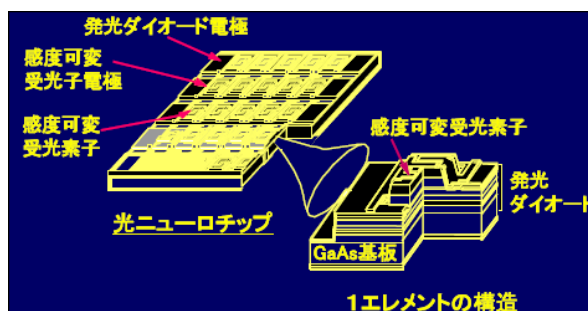


図2：光ニューロチップの構造[5]

LSIでワイヤー配線するのは原理的に難しい。それでは、光の三次元空間性を使って配線したらどうか。」[4]と考えた。研究を重ねるなかで、久間氏は「ニューラルネットワークの基本演算であるベクトルとマトリックスのかけ算を光技術でおこなえばよい（光ベクトル×マトリックス乗算）」[4]という結論に到達した。光ニューロチップの概要は図2となる。

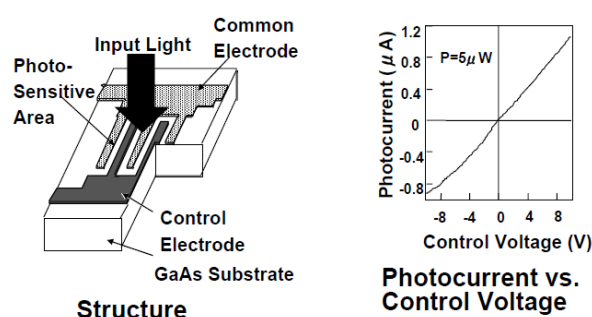


図3：感度可変受光子[5]

上記の内容を踏まえ、光ニューロチップについて詳しく見ていく。光ニューロチップには、シナプス結合を光技術で実現している、発光素子アレイと感度可変受光子アレイによる三次元光集積回路である、オンチップ学習機能を搭載しているという3つの特徴がある。光ニューロチップの開発段階では2つの重要な発明があった。一つ目は、空間光変調素子と受光子の機能を兼ね備えた感度可変受光子の考案である。感度可変受光子の仕組みを示したものが図3である。二つ目は、一次元の入力信号を二次元のマトリックスに対応させ、さらに一次元の入力信号に変換する三次元集積型光電子ベクトル・マトリックス乗算器の考案である。発光ダイオード²¹のアレイと受光子のアレイを直交させることで二次元アレイを構成し、その間に空間光変調素子を挟み込むという構成が考えだされた。この構成には、発光素子アレイに加えるベクトルと二次元の空間光変調素子に与えるマト

¹⁹ 空間光変調素子 (Spatial Light Modulating Element) [4]：二次元並列光情報の強度や偏光パターンを、実時間で変調させる機能を持つ光素子。光ニューラルネットワークでは、光ニューロン間を配線する光シナプス結合素子として不可欠なデバイス。

²⁰ シリコン (Silicone) [4]：非金属元素のひとつ。ケイ素。半導体 IC (Integrated Circuit：集積回路) の材料として使われる。

²¹ 発光ダイオード (Light Emitting Diode) [4]：電流を光に変換する半導体発光素子。レーザー光と異なり自然放出光を利用するので、コヒーレンスも偏光となり光を放出する。材料により、青色から近赤外の波長が得られる。

リックス信号の積和が受光素子アレイで得られるというメリットがある。結果、人間の脳の構造に近い超並列・超高速の神経回路が実現される。光の空間並列処理をおこなう光電子ベクトル・マトリックス乗算器の仕組み（原理）を示したものが図4である。

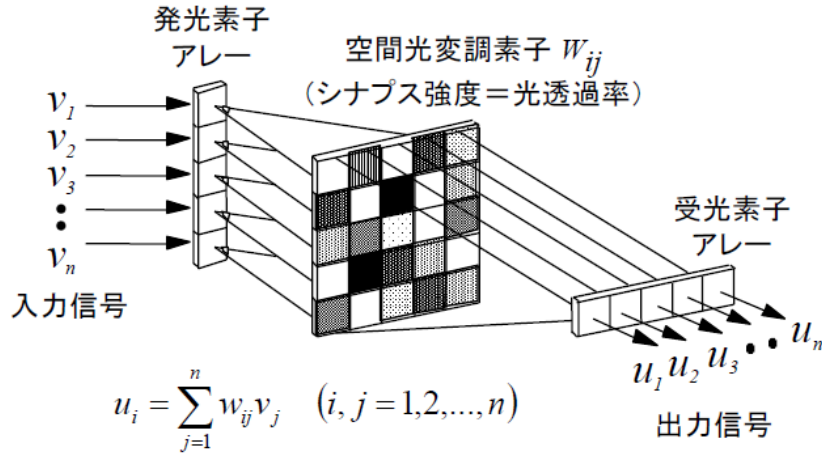


図4：光電子ベクトル・マトリックス乗算器[5]

光ニューロチップの開発には、情報処理技術、半導体デバイスの視点から3つの特徴があった。第1に、光情報処理の特長を活用することで、空間並列処理・アナログ演算に注目した開発をおこなうという点が挙げられる。第2に、光情報処理の弱点、即ち光情報処理の低精度性をニューラルネットワークのアルゴリズムで補う開発をおこなうという点が挙げられる。第3に、ハードウェアとソフトウェアを融合した“ソフトデバイス²²⁾”の提案・開発をおこなうという点が挙げられる。そして、1989年には図5で示した構造の光ニューロチップによるアルファベット26文字の認識に成功した。

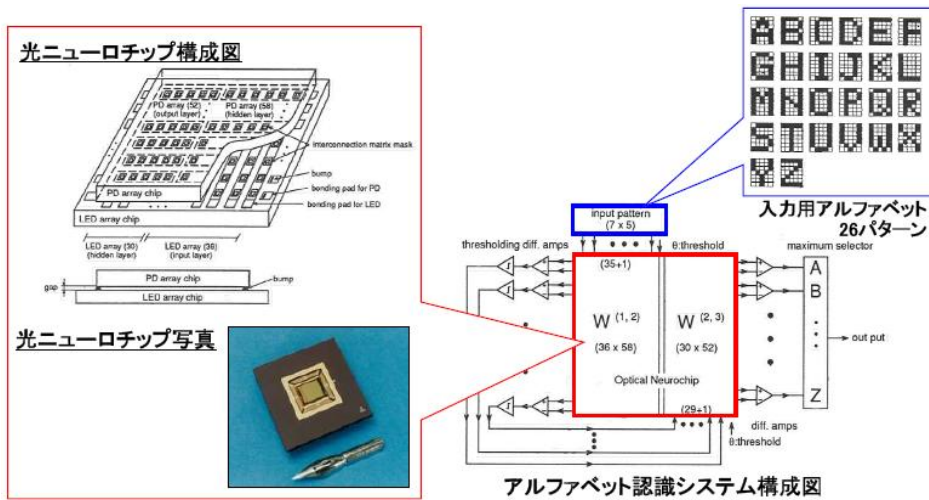


図5：光ニューロチップを用いたアルファベット認識システム[5]

当時、光ニューロチップ開発は困難を極めた。この段階は、研究開発のなかでも特に研究の意味合いが強い段階である。ここでは、不確定・未知数の部分が多いなかでも如何に

²²⁾ ソフトデバイス (Soft Device) [5]：ソフトウェアで起動するデバイス。

研究を進めることができたのかについて考えていく。光ニューロチップ開発段階における重要な意思決定とモチベーション要因は、下記のものであったと久間氏は述べている[9]。

－ 重要な意思決定 －

- ① ハードウェアとソフトウェアを融合した“ソフトデバイス”として“光ニューロチップ”を提唱したこと。
- ② 光通信用 OEIC²³の研究を全面的に中止して、光ニューロチップの研究開発を開始したこと。

－ モチベーション要因 －

- ① 世界初の独創的な研究開発成果を産み出すこと。
- ② 人間のような柔軟な情報処理技術が要求される時代が必ず到来すると予測していたこと。
- ③ 光の空間並列性とニューラルネットのアルゴリズムは、相互の長所を活かし、欠点を補う関係にあると確信していたこと。
- ④ ハードウェアのみの半導体デバイス事業は長続きしない、何れ新興国に追いつかれると確信していたこと。

久間氏らの光ニューロチップの開発成果は、世界的に大きなインパクトを与えた学術成果となった。光ニューロチップには、3つの意義があった。第1にニューラルネットワークモデルという高度なアルゴリズムを内蔵した LSI の先鞭をつけたこと、第2に光の空間並列性を活用した三次元光集積回路の先鞭をつけたこと、第3に人工網膜 LSI という新しい実用的な撮像デバイスが生まれたことである。

学術的には大きな成果を挙げた一方で、企業では実用化が重要となってくる。ところが、実用化には数多くの問題が山積していた。当時、久間氏は立体的な回路を集積化してみようと考えていた。実際、研究ではできるが、なかなか実用化されない。その主要な理由は、次の2点である。第1に、材料がガリウム砒素を用いていたため、コスト高、歩留まり率の問題を解決するのが極めて困難であった点が挙げられる。第2に、ニューラルネットワークのアルゴリズムがまだまだ不十分であった点が挙げられる。

このような中で、久間氏は、“脳を光学的なモデルにしたい”という思いと光ニューロチップ実用化の折衷点として画像処理機能に注目していくことになる。具体的には、人間の神経系の処理のうち、複雑な脳の仕組みの実現から、眼における画像処理の実現に研究・開発を集中した。つまり、生物の「脳」ではなく「眼」を工学的に実現することを主要な研究対象とした。こうして、学習する光ニューロチップ開発の経験を用いた人工網膜 LSI の開発が始まった。

²³ OEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit) : 光電子集積回路。

3. 人工網膜 LSI 開発への道

久間氏は、光ニューロチップから人工網膜 LSI へと、ビジョンチップ開発のパラダイムシフトをおこなった。具体的には、脳のデバイス化を目指した光ニューロチップ開発で培った技術を活用して人工の眼をつくろうと考えた。なぜなら、眼のメカニズムは脳のメカニズムに比べて研究が進んでおり、ある程度分かっていたためである。久間氏は、眼の構造を人工的に半導体でつくり込むことを目指した。

人間の網膜にある視細胞には、カラー情報を識別する錐体とモノクロ情報を識別する杆体がある。この視細胞は、光刺激を吸収し電気信号へと変換する役割を持つ。実際、眼はセンサであると同時にプロセッサである（処理をしている）ため、それをエンジニアリングで開発すれば良いと当時の久間氏は考えた。この段階で、既に人工網膜 LSI にはチップ上に処理まで取り込もうと考えた。そして、動いているものだけを捕まえる・画像の境界を強調する（エッジ強調）機能を持ったデバイス（それが、人工の眼に相当する）を開発した。即ち、“画像を見る”だけのデバイスではなく、人間の視覚機能に迫った“画像を認識・処理する”デバイスを開発した。久間氏は、これを“人工網膜 LSI”と名付けた。

以上を整理すると、人工網膜 LSI を研究対象とした理由は、次の 2 点である。第 1 に、光ニューロチップは斬新なデバイスであったが、これを活用できる情報処理モデル研究が未熟であった。このため、脳の高次処理に比べて原理が比較的解明されていた視覚情報処理に研究の対象を移した。第 2 に、利用した材料（ガリウム砒素）が集積回路に不向きであることから、実用化には遠かった。このため、量産化を目指し、DRAM や CPU と同じシリコン CMOS 回路をベースとした開発に移行した。半導体はガリウム砒素に置き換わると考えられていた時代もあったが、久間氏はガリウム砒素をシリコンに変えないといけないと感じていた。光ニューロチップの場合には、発光素子が必要なので、ガリウム砒素でなければ実現できなかった。ところが、人工網膜 LSI の場合は、受光素子だけで良いため、ガリウム砒素である必要が無くなった。研究対象を光ニューロチップから人工網膜 LSI に変更することで、材料をガリウム砒素からシリコンに変えることができたのである。

当時、10 人位のグループリーダーであった久間氏は、思い切ってガリウム砒素・プロセス・結晶成長の研究を止め、シリコンの研究に専念することにした。ガリウム砒素の研究をしていた当時のグループメンバーには、シリコンの設計の勉強をさせた。そして、そのメンバーをそのまま人工網膜 LSI の研究に参加させた。

人工網膜 LSI の研究が進展し実際にチップを試作してみる段階まで到達したが、久間氏のグループが所属する開発本部にはシリコン LSI の試作ラインがなかった。そこで、人工網膜 LSI の試作を会社内の ULSI²⁴研究所にお願いしたが断られた。久間氏は、「三菱電機にはシリコン LSI の部門があるので、頼めばやってくれるだろうと思ったら大間違いでし

²⁴ ULSI (Ultra Large Scale Integration) : 1 チップ当たりの半導体素子の集積度が 1000 万個を超える集積回路。

た。当時、人工網膜 LSI は海のものとも山のものともわからない LSI でしたので、当然のことですが、何も教えてくれませんでしたし、まして『工場を貸してくれ』なんて言える状況ではありませんでした」[4]と述べている。久間氏は当時の開発本部の研究所長に頼み込み、数千万規模の予算を捻出してもらいフランスのファウンドリ²⁵に試作を依頼した。確かに事業部としても市場規模の見えない LSI の試作を快諾するのは事業部側の意思決定としても困難であったと想定できる。このため、久間氏らは自分達でやるしかないと考えようになっていった。当初、ガリウム砒素の研究をしたいと考えていたメンバーも次第に Si (Silicon) -人工網膜 LSI の研究が面白いと感じるようになっていた[6]。久間氏を中心としたメンバーの一体感と当事者意識が人工網膜 LSI の開発をより一層促進させていった。

久間氏は、ニューロチップから人工網膜 LSI へと研究を進めていくなかで、ニューロチップはハードウェアを中心に考えてきたが本質はアルゴリズムであると感じるようになった。人間の脳のメカニズムを如何にソフトウェアでつくっていくかを考えると、ガリウム砒素の研究をしていたハードウェア寄りのメンバーだけでは実現が困難であると感じるようになった。そこで、久間氏は研究所内でソフトウェアの理論に強い田中健一氏²⁶（以下、田中氏）をグループメンバーに加えたいと考えた。久間氏は、田中氏の上司と当時の研究所長を口説き田中氏をグループメンバーに迎えた。これ以降は、久間氏が全体のマネジメントとハードウェアを中心的に担当し、田中氏がソフトウェアを中心的に担当した。当時、久間氏はグループリーダーから部長に昇進した頃であった。田中氏は、「(久間氏は) 技術的な目標を高く定め、ロジカルに説明されることから周囲に信頼されていた」[5]と述べている。また、「(久間氏は) 人や組織に対するケアが優れていた。研究開発に必要な技術を持つ優秀な学生を自ら探して採用し、組織を強化していた。」[5]とも述べている。この環境は、久間氏を中心に集団凝集性を一段と高める効果を創出した。久間氏は、部長昇進後もどんどんメンバーを増やしていった。久間氏の担当部署は、人工網膜の研究だけでなく、シリコンのニューロチップなど様々な研究をするようになっていった。当時、社内では LSI 事業の大改革がおこなわれ、光ニューロチップや人工網膜 LSI 以外に、LSI によるニューロチップ、ファジーチップ、データフローチップなどの研究もおこなった。LSI 事業の改革の結果、様々な専門領域を持った研究者がメンバーに加わったことにより人工網膜 LSI の研究が加速した。彼らは、特にシリコンの設計者として大きな役割を果たした。

ここでは、人工網膜 LSI の仕組みを理解するために、イメージセンサに関しても整理をおこなっておく。当時のイメージセンサには、CCD と CMOS センサがあった。人工網膜 LSI は CMOS プロセスを利用しているが、CCD や CMOS のイメージセンサと比較すると次のような主要な特徴がある。人工網膜 LSI は、CMOS センサ同様、消費電力が CCD の約十分の一で済む。また、人工網膜 LSI の最大の特徴は、CMOS イメージセンサに演算機

²⁵ ファウンドリ (Foundry) : 半導体デバイス・半導体チップを製造や生産を専門におこなう企業若しくは工場。

²⁶ 田中健一氏 : 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所所長 【2011年04月01日時点】。

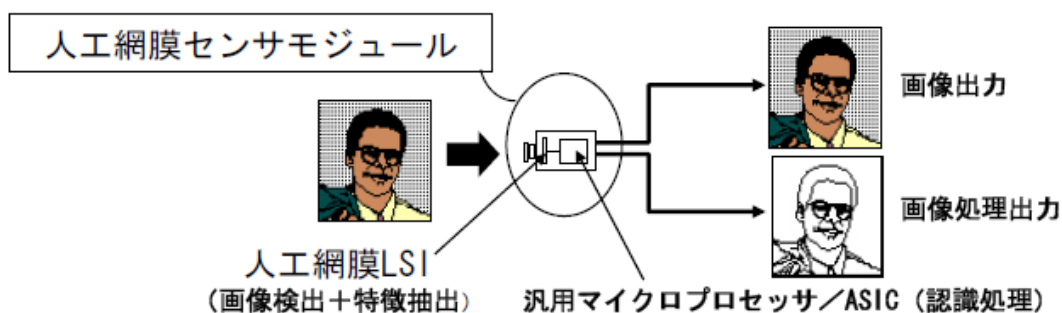
能を加えることで、画像検出と画像処理がオンチップ上でおこなえる点にある。CMOS プロセスを使っているため、他の半導体回路との集積化も容易におこなえる。さらに、人工網膜 LSI は、新概念の知的画像センサであることから、画像を取り込むだけの CCD とは違い、後段に高性能な専用プロセッサは必要なく、安価な汎用マイコンだけで十分に機能を発揮するという利点がある。人工網膜 LSI の主要な特徴を CCD/CMOS センサと比較すると表 1 となり、画像処理システムの違いを概念的に示したものが図 6 となる。

表 1：イメージセンサの種類[5]

	CCD	CMOS	人工網膜 LSI
Type	電荷蓄積型	MOS 型	MOS 型+演算機能
電源電圧	3 電源又はそれ以上 (5.5V,3.3V,1.5V)	1 電源(2.8~5.0V)	
消費電力	200~800mW	20~80mW	
画像処理機能	画像検出のみ		画像検出 +オンチップ画像処理機能
メリット	技術的に完成 ノイズ小	他の回路との集積化容易	新概念の知的画像センサであり 他の回路との集積化容易



CCD/CMOSイメージセンサによる画像処理システム



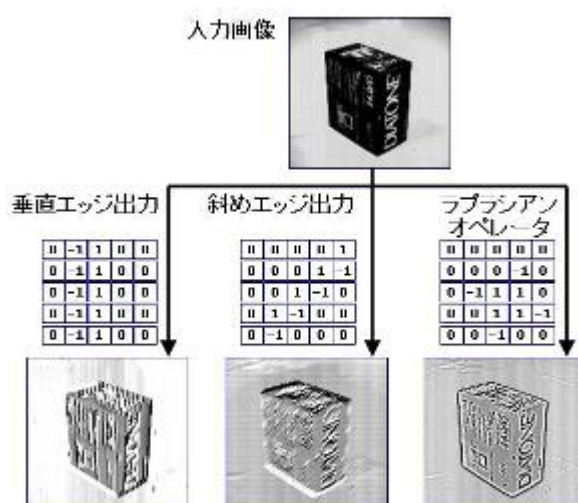
人工網膜LSIによる画像処理システム

図 6：人工網膜 LSI の概念[5]

人工網膜 LSI では、カーネル係数と呼ばれるレジスタ値を設定することで様々なチップ上画像処理機能を実現することができる。エッジ検出を例にとると、図 7 (a)に示すように

カーネル係数を変更することで垂直エッジ出力，斜めエッジ出力，ラプラシアンオペレータなどの処理結果が得られる．エッジ検出とは特徴抽出の一種で，空間的な画像の明るさの変化により生じる対象の輪郭を算出するアルゴリズムのことであり，画像内の明るさが不連続に変化している部分を対象と背景の境界として抽出することができる．人工網膜 LSI 内の全ての画素は輝度情報を保持しているのので，明るさの変化値は微分演算を利用することで算出できる．また図 7 (b)に示すようにカーネル係数の設定により，エッジ検出だけでなく通常の画像検出や 2D → 1D への射影出力，あるいはランダムアクセスなどの画像処理機能を利用することができる．

(a) カーネル係数設定によるチップ上画像処理：エッジ検出の例



(b) カーネル係数設定とチップ上画像処理の関係

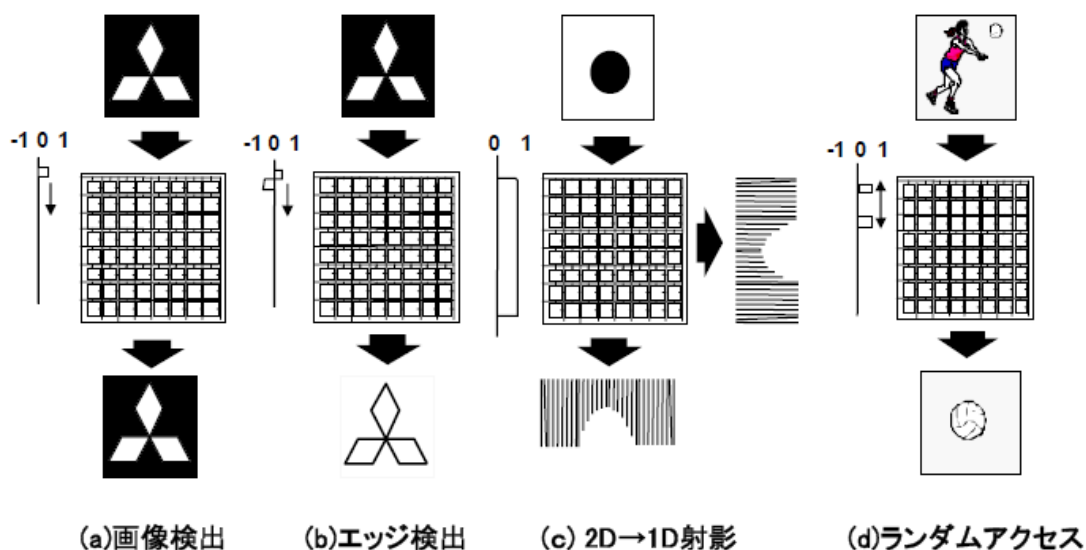


図 7：人工網膜 LSI のチップ上画像処理機能[5]

次に射影出力について説明する．射影出力とは，二次元画像の各画素値を水平方向および垂直方向に加算した射影データを方向別に出力的ることにより得られる．射影出力につ

いては 2 種類ある。一つは図 8 に示すように画素エリア全体の画素値を水平方向あるいは垂直方向に加算して得られる全領域射影出力，もう一つは図 9 に示すように画素エリアを 9 分割し周辺 4 領域と中央領域内の画素に対して領域内毎に画素値を水平・垂直方向に加算することによって得られる 9 分割射影出力がある。周辺 4 領域とは，画像を 9 分割した時に右上角・右下角・左上角・左下角に位置する領域のことであり，中央領域とは，画像を 9 分割した時に上下左右ともに真ん中に位置する領域のことである。いずれも射影データは各領域において下方向と右方向に向かって射影され，出力される。人工網膜 LSI では，全領域射影出力と 9 分割射影出力のいずれの処理もサポートしており，利用可能である。

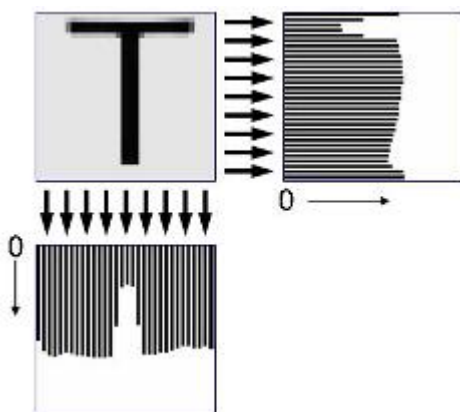


図 8：人工網膜 LSI の全画素領域射影出力[5]

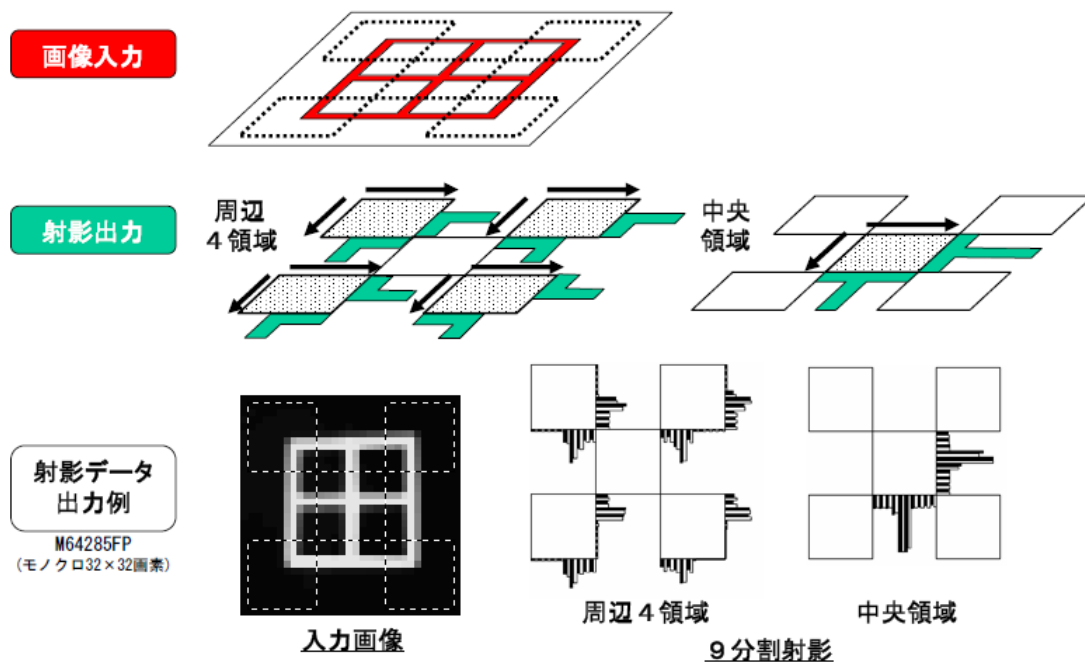


図 9：人工網膜 LSI の 9 分割射影出力[5]

また，人工網膜 LSI によるランダム（ブロック）アクセスとは，図 10 に示すように画素エリア中の任意の矩形領域をレジスタ指定し，その領域の画素値のみを出力できる機能であり，高速処理が要求される画像処理アプリケーションで威力を発揮する。

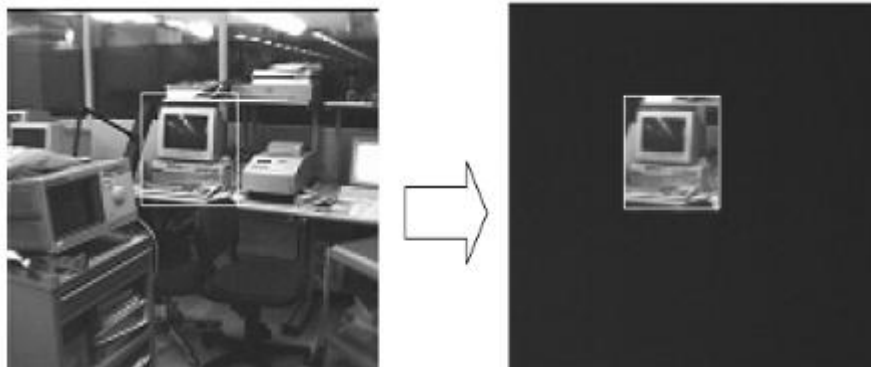


図 10 : ランダムブロックアクセスの実測例[5]

人工網膜 LSI は、様々な研究を重ねた結果、遂に具体的なシステムの提案にまで至った。ここでは、1995 年に提案した“セキュリティネットワークシステム”と 1997 年に提案した“パーソナルホームセキュリティシステム”という人工網膜 LSI 事業化前の 2 つの主要な提案例の解説をおこなう。

(1) セキュリティネットワークシステム

セキュリティネットワークシステムとは、人工網膜 LSI を使った監視カメラを多数の場所に配置し、それらからの情報を一か所のホストコンピュータに集めることでセキュリティ機能を高めるシステムである。これには 3 つの大きな特徴がある。第 1 に、人工網膜 LSI・マイコン・メモリを搭載した人工網膜カメラのネットワーク接続が可能である。第 2 に、個々のカメラで「動くもの」などの画像の分散処理が可能である。第 3 に、カメラ側に画像処理機能を搭載しているのでホストコンピュータの負担の低減が可能である。1995 年に提案されたセキュリティネットワークシステムの仕様を示すと表 2, 概要を示すと図 11 となる。

表 2 : セキュリティネットワークシステムの仕様 (1995 年提案) [5]

人工網膜 LSI 画素数	128×128	
マイコン	M16C (16 ビット, 2.5MIPS)	
SRAM	1M ビット	
通信方式	RS485	
最大接続数	128	
通信速度	1Mbps	
消費電流	待機時	75mA
	通信時	125mA

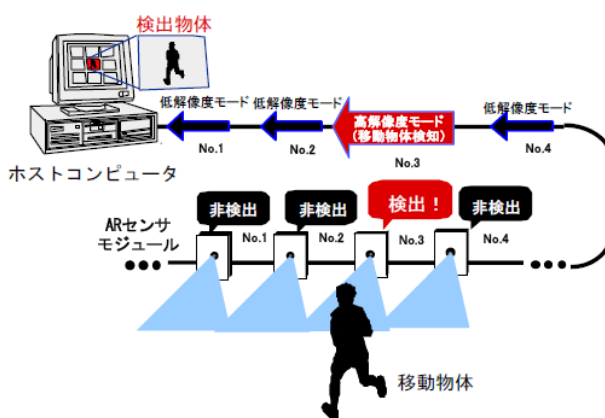


図 11 : セキュリティネットワークシステム (1995 年提案) [5]

(2) パーソナルホームセキュリティシステム

パーソナルホームセキュリティシステムとは、携帯電話などで外出先から自宅のセキュリティ状態を監視できるシステムである。これには2つの大きな特徴がある。第1に、無線接続のため、設置が簡単で好きな場所に移動できる。第2に、スペクトラム拡散通信技術によりデータを断片化するため、情報が漏れにくく妨害に強い。本研究は1997年に提案され[5]、2000年にTIME誌で紹介された[10]。同システムの概要を図12に示す。

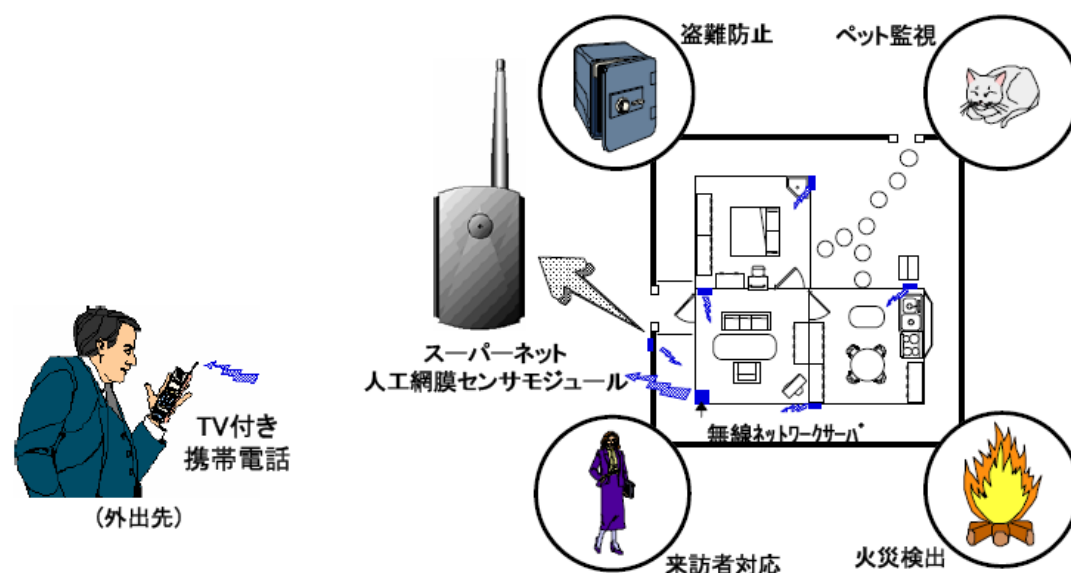


図12：パーソナルホームセキュリティシステム—スーパーネット人工網膜カメラ応用—
(1997年提案) [5,10]

三菱電機には、シリコン LSI の部門が以前からあった。しかし、当時の人工網膜 LSI は、海のものとも山のものとも分からない LSI であったことから、LSI の部門から協力を得られることは皆無と言って良い程無かった。結局、シリコン LSI の設計の経験のない研究者が独学で勉強し、1994年にシリコンの人工網膜 LSI の第1号が完成した。このことから、人工網膜 LSI 開発段階における久間氏のグループは、幾多の困難を乗り越え研究を進めていったことが推察できる。人工網膜 LSI 開発段階における重要な意思決定とモチベーション要因は、下記のものであったと久間氏は述べている[9]。

— 重要な意思決定 —

- ① 光ニューロチップの開発結果はセンセーショナルで、国際学会、メディアでも大変な注目を浴びたが、企業の研究は事業化されなければ価値はないと判断して、開発を中止したこと。
- ② 脳を模倣する光ニューロチップよりも処理機能が単純な眼を模倣する人工網膜 LSI に開発のターゲットを変えたこと。
- ③ ガリウム砒素を止めてシリコン CMOS 技術を活用した結果、量産性に優れた安価なデ

バイスの生産が可能になったこと。

- ④ これまでの結晶成長やプロセス技術中心の開発から，受光素子を含むアナログ，デジタル混載の回路設計技術に組織のコア技術を変えたこと。

－ モチベーション要因 －

- ① 化合物半導体（ガリウム砒素）を用い層状（立体）構造の光集積回路である量産化が困難な光ニューロチップからシリコンを用いた量産化が可能な人工網膜 LSI に研究領域を変えたこと。
- ② 先進的な人工網膜 LSI のアルゴリズムを自ら完成させようと考えていたこと。

人工網膜 LSI の開発は，着実に進んでいった。久間氏らは，低雑音化への取り組みとして 2 つの開発をおこなった。一つ目は，埋め込みフォトダイオード²⁷の開発をおこなった。具体的には，フォトダイオードのリーク電流²⁸に対して，高濃度キャップ層によるリーク電流の吸収をおこなった。二つ目は，雑音除去回路の開発をおこなった。具体的には，MOS トランジスタの特性バラツキを解決するために，二重相関サンプリング回路によるバラツキ補償をおこなった。2 つの開発の結果，SN 比 60dB の人工網膜 LSI を実現した。

当時の人工網膜 LSI は，性能的にも CCD を凌駕しつつあった。カーネル係数を変えれば CCD と同じイメージセンサとして使え，さらにエッジだけを取り出すこともできるようになった。久間氏は，「ここまでくると，もう人間の眼以上である」[4]と確信し，これは事業化できると思うようになった。そこで，久間氏は自分の足でお客さんのところに持っていく，人工網膜 LSI を使ってくれるようお願いするようになった。久間氏は，「これまでのシーズ指向の研究から，ニーズ志向の研究に方針を変えて，実用に適した人工網膜 LSI を開発し始めたのは，このころです」[4]と述べている。遂に，人工網膜 LSI の研究から人工網膜 LSI の事業化へと移行していった。即ち，人工網膜 LSI はいよいよ生産・販売を意識した製品化のステージに入っていくことになった。

²⁷ フォトダイオード (PD : Photodiode) [4] : pn 接合や金属と半導体接合部に光を与えると，光電効果により電子とホールが対が発生する。この現象を利用した光検出器。

²⁸ リーク電流 (Leak Current) : 絶縁されていて電流が本来流れるはずのない場所・経路で漏洩 (リーク) する現象。

4. 人工網膜 LSI 事業化と新規市場開拓

人工網膜 LSI 事業は、1998 年に半導体事業部で事業化が開始された。当時は、15 名（研究所出身 12 名と半導体事業本部出身 3 名）でスタートした。半導体事業本部出身者がハードウェア中心の設計グループに加わり、人工網膜 LSI の量産体制が整備された。久間氏は、人工網膜 LSI 事業推進プロジェクトグループのリーダーであった。また、田中氏はこれまで同様、ソフトウェアを中心に担当した。特に命令の一元化・スピーディな対応を重視した。人工網膜 LSI 開発体制（1998 年 4 月～2003 年 3 月）は、図 13 に示した体制であった。

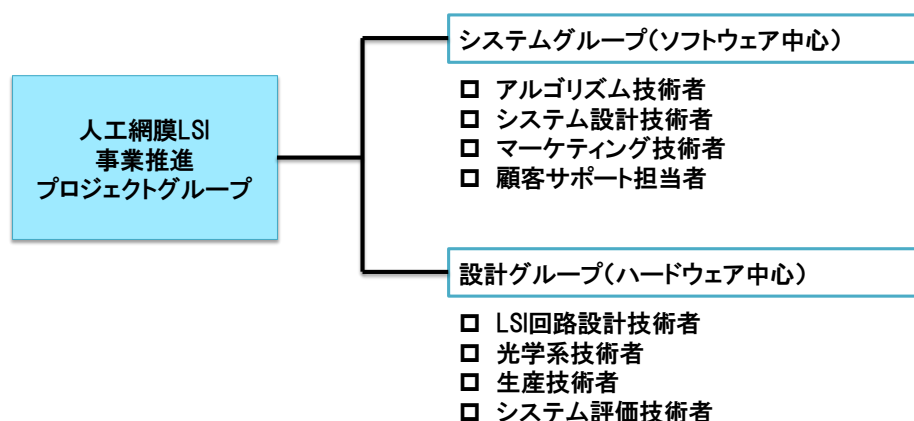


図 13：人工網膜 LSI 事業推進体制（著者加筆）[5]

初めに、ここでは当時考えられた人工網膜 LSI のコンセプトとビジネスモデルについて紹介する。イノベーションの観点から見た人工網膜 LSI の差別化のポイントは、新しいコンセプトと付加価値の創出である。第 1 に、新しいコンセプトは下記の通りである。

人工網膜 LSI = イメージセンサ + プロセッサ

第 2 に、主要な付加価値の創出とは、下記の 2 点である。

- ハードウェア・ソフトウェア両面からのソリューションの提供
- 頭脳を使った付加価値の創出(アルゴリズム)

また、人工網膜 LSI のビジネスモデルを下記のように考えた。

人工網膜 LSI のビジネスモデル

= システムソリューションプロバイダ

(ハードウェアとソフトウェアを組合せたシステムソリューションの提案)

モバイル：業界最高水準の撮像センサ+キラーアプリ

セキュリティシステム：分散処理型ネットワークカメラシステム+認識アルゴリズム

人工網膜 LSI のコンセプトとビジネスモデルを踏まえ、さらに人工網膜 LSI の特徴を見ていく。人工網膜 LSI の主要な特徴としては、画像処理能力の保持、低価格、低消費電力、高速動作、輪郭強調機能、小型の面実装透明モールドパッケージであることが挙げられる。人工網膜 LSI の主要な特徴を詳細に整理すると下記の 10 点が挙げられる[11]。

- ① 1 チップで画像情報の検出と複数の画像処理ができる。
 - (ア) 画像の検出 (従来の CCD の機能)
 - (イ) エッジ検出
 - (ウ) エッジ強調
 - (エ) ノイズ除去 (平滑化)
 - (オ) 2D → 1D 射影 (二次元画像情報を一次元情報に圧縮)
 - (カ) 解像度可変
 - (キ) パターンマッチング (指定した画像の検出)
 - (ク) ランダムアクセス (画像中の任意の箇所のみ選択的に検出)
 - (ケ) 平均出力 (全画像または任意の箇所の平均値を算出)
- ② 高速で画像処理ができる。
 - (ア) フレームレート 1~5,000fps (フレームレート可変)
- ③ 単一電源 (3V 又は 5V) で動作する。
- ④ 低消費電力 (CCD の約 1/10) で動作する。
- ⑤ S/N²⁹が高く (55dB 以上)、高品質な画質である。
- ⑥ ダイナミックレンジが広い (60dB 以上)。
- ⑦ スミア³⁰、ブルーミング³¹が無い。
- ⑧ 標準 CMOS プロセスを使用している。
 - (ア) ロジック、アナログ回路、アナログ→デジタル変換回路などの集積化が容易
 - (イ) 低コスト
- ⑨ 将来的にはマイコンやメモリとの集積化が容易に実現できる。
- ⑩ 小型透明モールドパッケージを使用している。
 - (ア) 小型実装が可能
 - (イ) 低コスト

²⁹ S/N : 信号雑音比 (Signal Noise Ratio) 若しくは信号対雑音比 (Signal to Noise ratio) の略称で、信号に対するノイズの量を対数で表したものである。S/N が高ければ伝送におけるノイズの影響が小さく、S/N が小さければ伝送におけるノイズの影響が大きい。

³⁰ スミア (Smear) : 周囲より極端に明るい被写体を撮影した際に白飛びする現象 (極端に明るい箇所を中心にノイズが発生する現象)。

³¹ ブルーミング (Blooming) : 短い時間で多量の光を受けた際に輝点の周囲に光がしみ出して広がる現象。

また、人工網膜 LSI と CCD を比較すると主に 8 つの特徴が挙げられる。具体的には、電力、消費電力、ウェハプロセス、フレームレート³²、S/N、画質、機能、価格である。これらの特徴に関して、人工網膜 LSI と CCD の比較をおこなうと表 3 となる。

表 3：人工網膜 LSI と CCD の比較 [11]

	人工網膜 LSI	CCD
電力	単一電源 (3V または 5V)	複数電源 (-10V ~ +15V)
消費電力	15~35mW	100~300mW
ウェハプロセス	標準 CMOS	CCD 専用
フレームレート	1~5,000fps	~60fps
S/N	60dB	60dB
画質	スミア無し	スミアあり
機能	① 画像検出 ② オンチップ画像処理 ③ CDS 回路, ゲイン調整回路, γ 補正回路, ホワイトバラン ス回路など内蔵 ④ アナログ-デジタル変換回路 内蔵	① 画像検出
価格*	1	2~3

*人工網膜 LSI を 1 とした場合の価格比

さらに、人工網膜 LSI の特徴を見ていく。最初に実用化した白黒用人工網膜 LSI は、安価かつ大量に生産することを目的として、新しい離形性の良い、成形時間の短い透明樹脂を用いた透明モールドパッケージを採用している。この透明樹脂は、三菱電機が開発した。主要な特徴は、表面の平坦性の向上、透明性の向上（離形剤を必要としない）、生産性の向上（離形剤の塗装工程を省略・樹脂の成形時間を 1/3 に短縮）という 3 点が挙げられる。その結果、生産性を向上させ、価格を抑えることに成功した。それまで主力であった CCD の中空パッケージと人工網膜 LSI 用透明モールドパッケージの比較をおこなうと表 4 となる。

表 4：CCD の中空パッケージと人工網膜 LSI 用透明モールドパッケージの比較[11]

	人工網膜 LSI 用透明モールドパッケージ	CCD 中空パッケージ
ダイボンド工程	フレーム単位で処理	単品で処理
封止工程	フレーム単位で処理	単品で処理
リード加工工程	フレーム単位で処理	単品で処理
パッケージ内結露	なし	あり
生産性*	5~7	1
価格**	1	3~5

*CCD の中空パッケージを 1 とした場合の比

**人工網膜 LSI 用透明モールドパッケージを 1 とした場合の比

³² フレームレート (Frame Rate)：単位時間あたり何度画面が更新されるかを表す指標であり、ここでは最も一般的な 1 秒あたりの数値である fps (Frames Per Second) という単位によって表わす。

当時の人工網膜 LSI の製品ラインナップを示すと表 5 となり、当時の人工網膜 LSI を利用して開発されたアルゴリズムラインナップを示すと表 6 となる。人工網膜 LSI には低解像度版の 32×32 画素と、より解像度の高い 128×128 画素・352×288 画素・640×480 画素がある。低解像度版の人工網膜 LSI は動き検出を得意とし、ボディアクション認識・ハンドジェスチャー認識・人検知・車検知や空間で用いるマウスを想定したポインティングデバイス応用などに用いられた。一方、高解像度版の人工網膜 LSI は、アプリケーションとして携帯電話搭載カメラ・数字認識・バーコード認識や指紋認識などに用いられた。

表 5：人工網膜 LSI の製品ラインナップ[5]

モジュールタイプ	M64285FP (モノクロ, 透明モールド PKG) M64285K (モノクロ, セラミック PKG)	M64283FP (モノクロ, 透明モールド PKG) M64283K (モノクロ, セラミック PKG)	M64270BG (カラー, レンズ付き)	M64276E-0X (カラー, レンズ一体型 PKG) M64287D (モノクロ, セラミック PKG)	M64277/8E-0X (カラー, レンズ付き)
画素数	32×32	128×128	160×3(R,G,B)×144	352×288	640×480
特徴	2D から 1D への射影機能	エッジ検出・強調機能 ランダムアクセス機能	エッジ強調機能	エッジ強調機能(M64276) 2D から 1D への射影機能 (M64276)	エッジ強調機能 2D から 1D への射影機能
	CDS 回路 出力レベル調整, ゲイン調整 黒レベル調整 データ出力レート可変 (2us - 32us /Pixel)	出力レベル調整, ゲイン調整 黒レベル調整	CDS 回路 ADC 回路 出力レベル調整, ゲイン調整 黒レベル調整 パワーセーブ機能 ガンマ補正回路 色補正回路	CDS 回路 ADC 回路 出力レベル調整, ゲイン調整 ガンマ補正回路(M64276) 色補正回路(M64276) フリッカノイズ除去機能 CIF から QCIF への解像度変換 (M64276) JPEG 圧縮, 伸張(M64276)	CDS 回路 ADC 回路 出力レベル調整, ゲイン調整 ガンマ補正回路, 色補正回路 パワーセーブ機能 ガンマ補正回路, 色補正回路 電子ズーム機能 フリッカノイズ除去機能 CIF, QCIF への解像度変換
	電源電圧:5.0V +/- 5% 消費電力:15mW フレームレート:350Hz(Max)	電源電圧:5.0V +/- 5% 消費電力:30mW フレームレート:30Hz(Max)	電源電圧:3.0V +/- 5% 消費電力:35mW フレームレート:10Hz(Max)	電源電圧: 2.85V +/- 0.1V(AR,ASICIO)(M64276) 1.8V +/- 0.1V(ASIC-core)(M642 76) 5.0V +/- 5% (M64287D) 消費電力: 45mW(M64276) フレームレート: 14Hz(Max)	電源電圧: 2.85V +/- 0.1V(AR,ASIC-IO) 1.8V +/- 0.1V(ASIC-core) 消費電力:70mW(M64277) 80mW(M64278) フレームレート:15Hz(Max)

表 6：人工網膜 LSI 応用アルゴリズムラインナップ[5,12]

人工網膜 LSI	低解像度版 (32×32 画素)			128×128 画素版	352×288 画素版
適用分野	動き検出センサ	方向検出センサ	形状認識センサ	文字/記号認識センサ	指紋検出センサ
表示例					
応用分野	ボディアクション認識 人検知	ポインティング デバイス	ハンドジェスチャー認識 人検知, 車検知	数字認識 バーコード認識	個人識別
アルゴリズム	オブテクタルフロー 差分画像解析	射影検出	重心検出・エッジ検出	パターンマッチング	エッジ検出
応用事例					
	CeBIT 1997 展示風景 (Hannover, Germany)	空間操作マウス エレクトロニクスショー 1999 に出 展	交通流監視風景 (国会議事堂前)	PC-PICO(バーコード認識, 1999年11月発売 開始)[12]	指紋入力モジュール

人工網膜 LSI は、主に 2 つの視点で応用された。一つ目は“画像を見る応用”，二つ目は“画像を使う応用”である。人工網膜 LSI の応用分野を整理すると表 7 となる。人工網膜センサモジュールは、“有線”と“無線”による視点と，“スタンドアロン型”と“ネットワーク型”による視点からモデルを考えていた。具体的に示すと図 14 となる。

表 7：人工網膜 LSI の応用分野[5]

	M64285FP/K (32×32 画素)	M64283FP/K (128×128 画素)	M64287D/U (352×288 画素)	M64270AG (160×144×3 画素,カラー)	M64271Y (352×288 画素,カラー)
画像を見る 応用	ゲーム機・玩具				
	携帯電話・インターホン				
	セキュリティ・監視			PC カメラ	
				自動車 (車外監視)	
画像を使う 応用	ゲーム機・玩具・ヒューマンインタフェース		指紋認証		
	ホームユース・家電				
	自動車 (車内監視)	FA・ロボット制御			

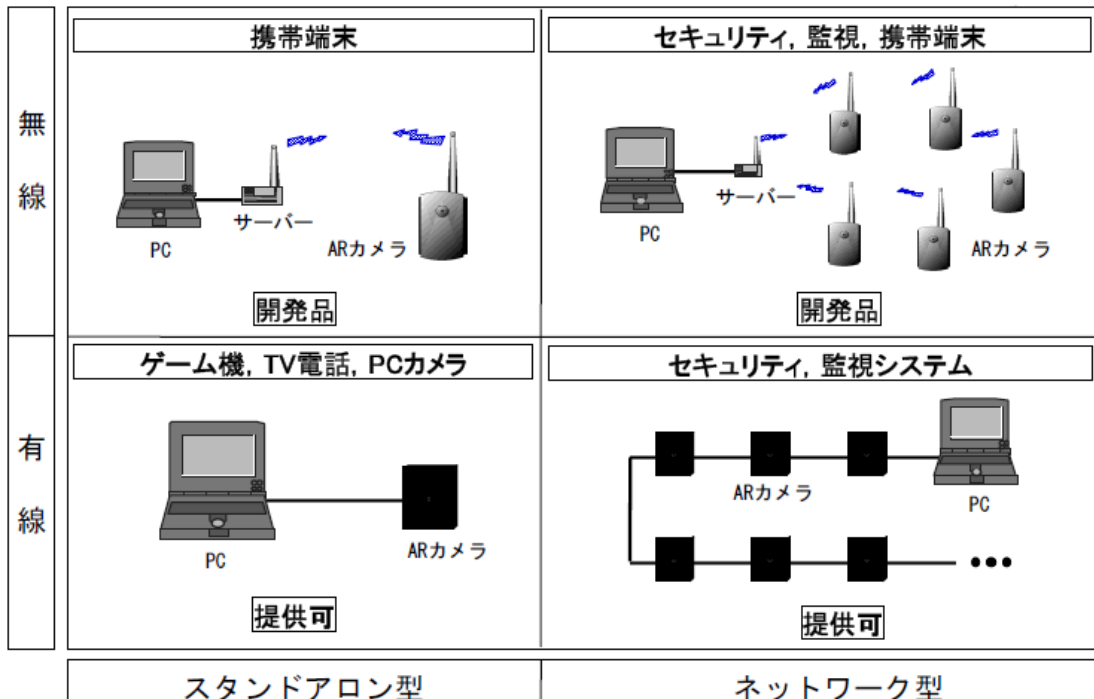
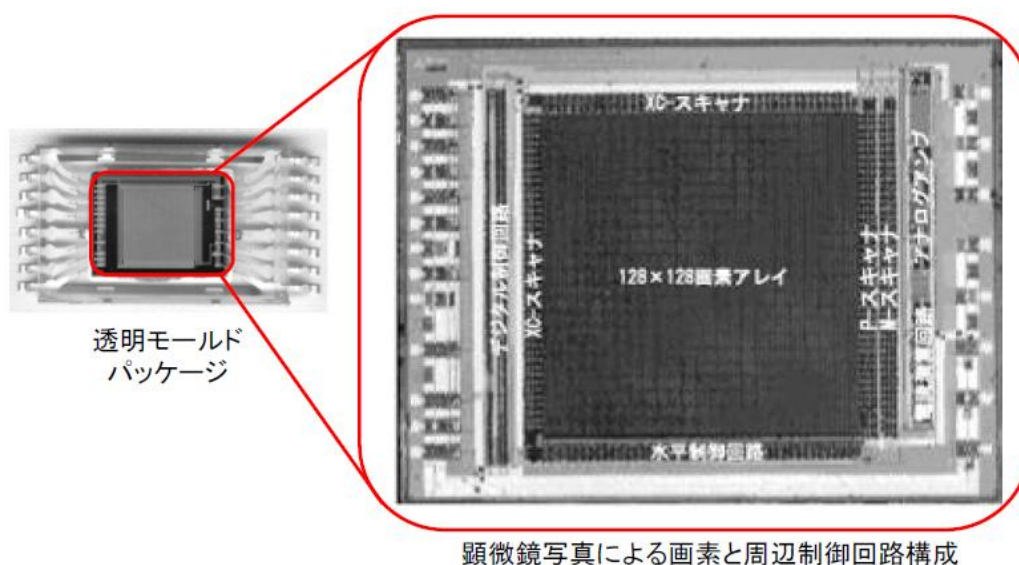


図 14：人工網膜センサモジュールの分類[5]

ここからは、世界初 CMOS センサの本格的量産と新規市場開拓について見ていく。久間氏は、「新事業を創出するには、概念形成や付加価値という“技の世界”と、性能向上や生産性という“力の世界”を両立する必要があります。」[4]と述べている。また、「大きなビジネスをつくるには大きな市場がないとダメだということです。そのような巨大市場を開拓しなければいけないので、いろいろな市場を探しました。行き着いたのが、携帯機器とセキュリティの分野です。」[4]と述べている。人工網膜 LSI 事業の製品 1 号機であるモノクロ版人工網膜 LSI が 1998 年 01 月に製造された。モノクロ版人工網膜 LSI を示すと図 15 となる。そして翌月には、任天堂株式会社（以下、任天堂）のポケットカメラとして販売された。任天堂が白黒の人工網膜 LSI を採用すると決定したのは 1996 年であった[4]。



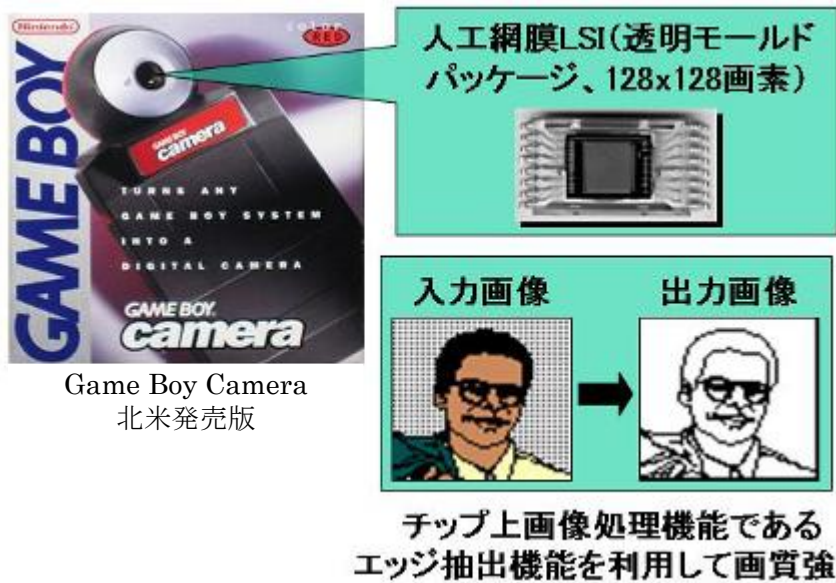
顕微鏡写真による画素と周辺制御回路構成

図 15：モノクロ版人工網膜 LSI（製品 1 号機：1998 年 01 月）[5]

ポケットカメラとは、任天堂ゲームボーイの周辺機器で、ゲームボーイにセットして使用するデジタルカメラのことである。仕様は、下記の通りである。

- 型名：MGB-006
- 消費電力：DC 5V 45mW
- 焦点距離：20cm～∞
- 画素数：14336（縦 112×横 128）画素 モノクロ 4 階調
- 本体寸法：幅 57mm×高さ 111mm×奥行き 37mm
- 本体重量：約 55g

任天堂ポケットカメラに三菱電機の人工網膜 LSI が採用されたポイントは、「人工網膜 LSI の特徴である輪郭強調機能、低消費電力、低コストと小型の面実装透明モールドパッケージであった」[11]ことだと述べられたそうである。当時のゲームボーイの液晶は電池寿命との兼ね合いからモノクロ 4 階調を採用しており、単純な取り込み画像を表示しても写真らしく見えなかった。人工網膜 LSI の輪郭強調機能を使うことで、4 階調の液晶でも写真らしい画像を表示できた。任天堂ポケットカメラを具体的に示すと図 16 となる。



Game Boy Camera
北米発売版

図 16 : 任天堂ポケットカメラ (1998 年 02 月 21 日販売開始) [5,13]

さらに、人工網膜 LSI は、KDDI 株式会社 (以下、KDDI) の携帯電話にも搭載された。1999 年には、ツーカー (TU-KA : KDDI が展開していた第二世代携帯電話サービスのブランド) に撮影画像をメールで送受信する技術の原型となる画像転送の商品 “LaPochee” を販売した。ここでは、世界初の携帯電話での画像伝送が実現された。その後、携帯電話によるカメラ市場が立ち上がり、画素数の高いカメラの開発が重ねられていった。人工網膜 LSI を搭載した携帯電話数も J-D05 (J-PHONE [現:ソフトバンクモバイル株式会社]:2001 年 08 月に発売された第二世代携帯電話端末製品) の頃は年間約 50 万個であったものが、N504iS (NTT docomo : 2002 年 11 月 22 日に発売された第二世代携帯電話端末製品) の頃は年間約 600 万個へと増加していった。当時用いられた 10 万画素カラー人工網膜 LSI の概要を示すと図 17 となる。また、人工網膜 LSI の携帯端末への搭載例を示すと図 18 となる。

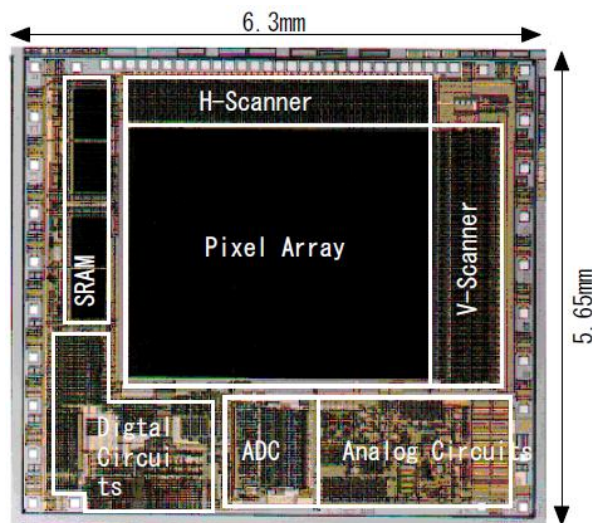


図 17 : 10 万画素カラー人工網膜 LSI の概要[5]

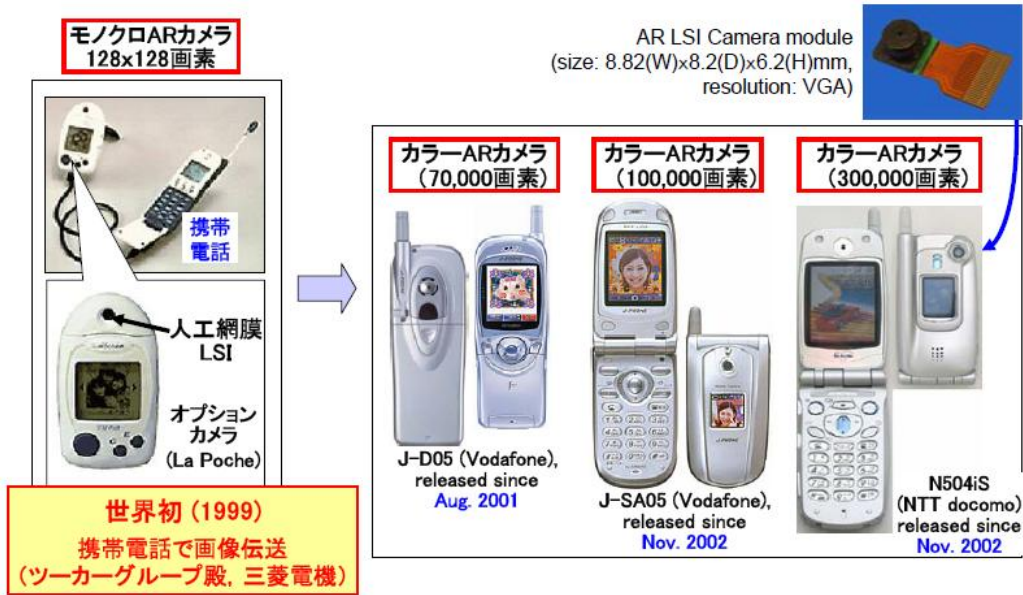


図 18：人工網膜 LSI の携帯端末への搭載例（1999-2002 年）[14,15,16,17]

1998 年の量産化以降、1999 年 03 月までに約 500 万個の生産実績をあげた。当時、三菱電機の CMOS 系イメージセンサの市場占有率は 98%以上であった[11]。その後、人工網膜 LSI は市場をさらに拡充していった。ここでは主要な 7 つの事例を紹介する。

(1) 駐車場監視ネットワーク

駐車場監視ネットワークは、三菱電機と三菱プレジジョン株式会社（以下、三菱プレジジョン）の共同開発によってつくられた。駐車場監視ネットワークは、「人工網膜カメラネットワークによる駐車場車庫の在否管理システム」[5]である。人工網膜カメラを示すと図 19 となり、駐車場監視ネットワークの概要を示すと図 20 となる。駐車場監視ネットワークは、カメラ単体で認識が可能で、ホスト PC に負荷がかからず、大規模監視ネットワークシステムの構築が容易という利点がある。また、車庫内車両の在否検知の他、セキュリティ用途にも応用可能である。実際、1999 年 09 月には、西銀座地下駐車場で運用が開始された。当時の西銀座地下駐車場で運用例を示すと図 21 となる。



図 19：人工網膜カメラ[5]

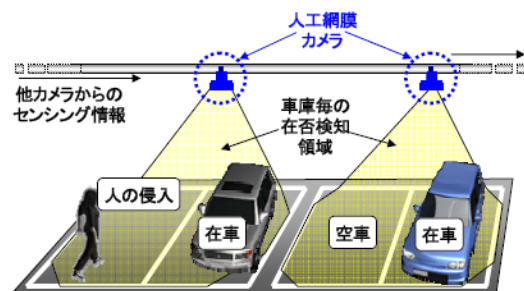


図 20：駐車場監視ネットワークの概要[5]



図 21 : 人工網膜カメラの西銀座地下駐車場における運用例 (1999 年 09 月運用開始) [5]

(2) PC-PICO

PC-PICO とは、「キーボードに慣れていない人でも簡単にパソコンを利用できる新しいユーザーインターフェースをもつ入力機器」である。PC-PICO は、株式会社セガトイズの OEM³³を用いリコーエレメックス株式会社が開発した商品である[12]。PC-PICO は、ユーザフレンドリーな PC 入力装置で、インターネット、電子メール、ワープロ、幼児教育などが簡単におこなえる。また、ページをめくるだけで、使いたいソフトが立ち上がる。この PC-PICO のページ認識に人工網膜センサモジュール (128×128 画素) が使用されている。PC-PICO は、1999 年 11 月に発売が開始され、当時は 23,300 円で販売されていた。PC-PICO を具体的に示すと図 22 となる。



図 22 : PC-PICO への搭載 (1999 年 11 月発売開始) [12]

(3) 指紋入力モジュール

2000 年 07 月には、CIF³⁴版モノクロ人工網膜 LSI (M64287U) が指紋入力モジュールに搭載された。具体的な指紋入力モジュールを示すと図 23 となり、指紋入力モジュールによる指紋検出例を示すと図 24 となる。

³³ OEM (Original Equipment Manufacturer) : 他社ブランドの製品を製造する企業。

³⁴ CIF (Common Intermediate Format) : ITU(国際電気通信連合)が定めた映像信号フォーマットの標準の一つで、解像度が 352×288 の動画を扱うフォーマット。

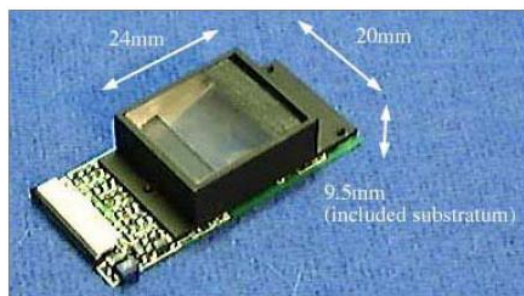


図 23：指紋入力モジュール
(2000年07月搭載開始) [5]



図 24：指紋検出例[5]

(4) 交通流センサ

交通流センサは2000年度に三菱プレジジョンが実用化した。交通流を予測することで渋滞低減や環境改善へ貢献することが期待されている。当時、小型の交通流センサは超音波³⁵方式で、超音波を出してそれが戻ってくるまでの時間を測ることでセンサ直下における車両の在否を検知した。この超音波方式を用い交通量（台数や渋滞度合い）を把握していた。これまでの交通流センサは、検知方式の性質上、通過車両が二輪であるか四輪であるかは判別できなかった。ところが、人工網膜 LSI を搭載した交通流センサはミニバンやトラックなど車の形状まで認識することができ、より精度の高い交通量情報を得ることができた。三菱プレジジョンが実用化した交通センサの ITS³⁶通過車両カウントセンサデモを示すと図 25 となる。

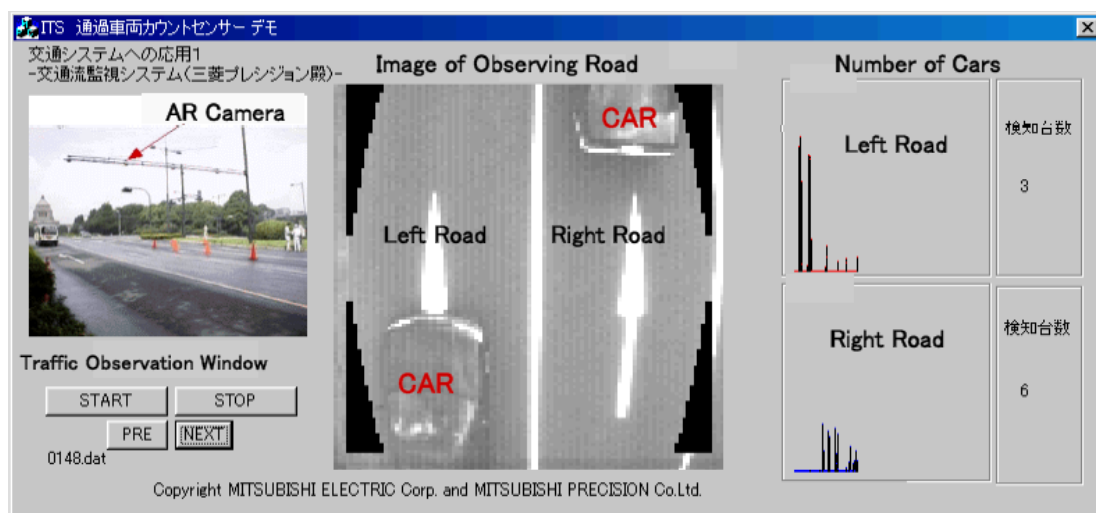


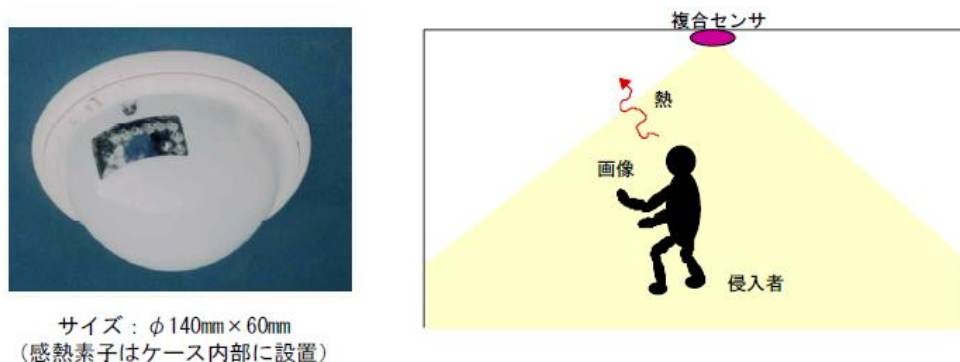
図 25：交通流センサ（2000年度実用化開始）[5]

³⁵ 超音波：定常音としては人間の耳に聞こえない高い周波数（振動数）をもつ弾性振動波。

³⁶ ITS（Intelligent Transportation Systems：高度交通システム）：IT（Information Technology：情報技術）を利用して交通の輸送効率や快適性の向上に寄与する一連のシステム群を指す総称名。

(5) 警備用複合センサ

警備用複合センサとは、「人工網膜 LSI と感熱素子を併用した侵入者検知センサ」[5]のことである。警備用複合センサは、“画像”と“熱”の2種類の信号を用いることで、小動物や温度変化による誤報を低減している。また、異常発生時の画像監視やメモリへの記憶が可能である。警備用複合センサは、2000年09月より実用化が開始された。実用化には、総合警備保障株式会社も関わった。警備用複合センサを具体的に示すと図26となる。



警備用複合センサの外観

警備用複合センサによる侵入者検知

図26：警備用複合センサ（2000年09月実用化開始）[5]

(6) 人工網膜 LSI・ゲームインタフェース製品化

1996年には、人工網膜 LSI によるオプティカルフロー検出を利用したジェスチャインタフェースが開発された。2000年には株式会社ナムコ（以下、ナムコ）のアーケードゲーム[18]、2001年にはコナミ株式会社（以下、コナミ）のガンシューティングゲーム[19]に人工網膜 LSI が採用された。2000年07月に登場したナムコのゲーム機“恋のパラパラ大作戦”[18]が、この種の実用化の第1号であった。人工網膜 LSI・ゲームインタフェース製品化の事例を具体的に示すと図27となる。

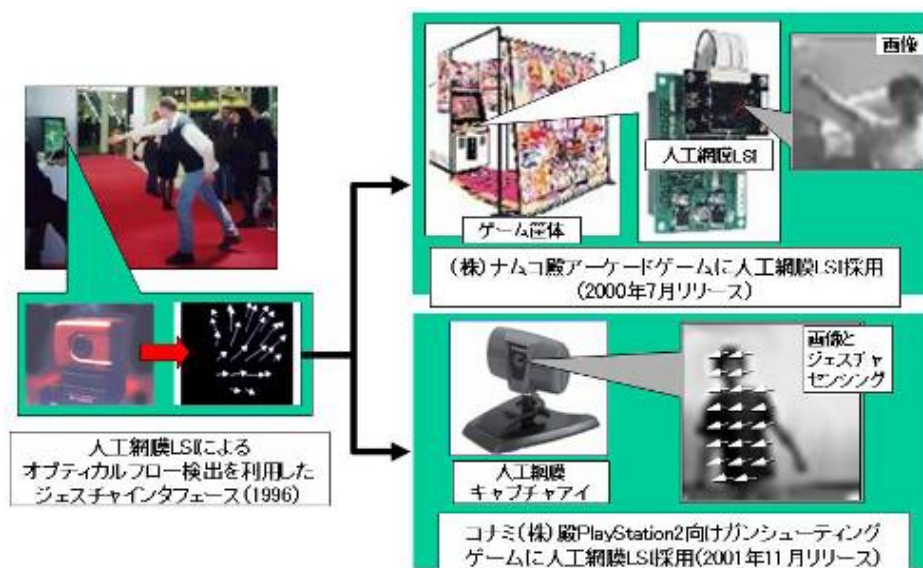


図27：人工網膜 LSI・ゲームインタフェース製品化事例（2000年－2001年）[18,19]

(7) 似顔絵生成技術

当時、モバイル機器のマルチメディア化が進み、モバイルカメラを搭載した携帯電話やメール端末の巨大市場が形成されつつあった。ところが、従来の似顔絵作成は多くの手操作、時間がかかる、似せるのが困難などという課題があった。そこで、これらの問題解決若しくは改善のために人工網膜 LSI を用いることを考えた。実際、カラー人工網膜 LSI は、高画質・低消費電力・画像処理機能を持ち、撮像した画像から高速かつ自然な似顔絵がリアルタイムに生成可能である。

カラー人工網膜 LSI の特徴は次の 4 点である。第 1 に、笑う・泣く・怒る等の感情を伴った似顔絵の生成が可能である。第 2 に、目、鼻、口などのパーツを置き換えて漫画風の似顔絵が可能である。第 3 に、人工網膜 LSI の持つ画像処理機能を利用して、高速かつ小容量のコードサイズで、リアルタイム似顔絵生成が可能である。第 4 に、微少な動き解析技術で顔領域の安定な切り出しが可能である。

当時、似顔絵生成時に用いられた人工網膜カメラを示すと図 28 となる。また、実際の人工網膜 LSI を用いた似顔絵生成例を示すと図 29 となる。



図 28：人工網膜カメラ[5]

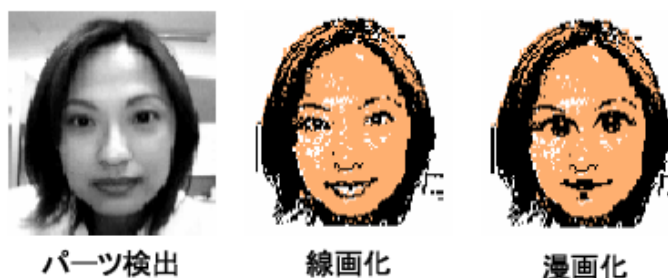


図 29：人工網膜 LSI を用いた似顔絵生成例[5]

人工網膜 LSI 事業は、上記の 7 つの事例からも分かるように様々な製品に用いられている。久間氏は、人工網膜 LSI 事業を振り返り、本事業には 3 つの主要な応用があり、「人工網膜 LSI を CMOS で実現したことが重要なポイントであった」[6]と述べている。

第 1 の応用は、“安い”というポイントと密接に結びついている。1998 年に人工網膜 LSI は任天堂のポケットカメラとして販売され、価格が安かったこともあり 200 万個という大ヒットとなった。一方、1999 年のツーカーの携帯電話では、10 万個も売れなかった。当時のカメラは携帯電話内臓ではなく、アダプタによる外付けオプションになっていた。受信側はカメラが無くても画像を受けることができたが、当時は画像を撮りたい、送受信したいというニーズは殆ど無かった。加えて、ツーカー同士でないと送受信できないという点がボトルネックとなった。即ち、当時の製品はネットワーク外部性が強く、このため販売数が伸びなかった。同年度（1999 年 02 月）には、NTT docomo が i モード³⁷のサービスを開始した。当時は、カメラ機能よりもメールに注目が集まった。そして、2 年後にシャープ

³⁷ i モード：株式会社エヌ・ティ・ティ・ドコモが提供する専用携帯電話を使用して電子メールの送受信やインターネット上を含むウェブページ閲覧などができるサービス。

株式会社が写メール³⁸を出したら爆発的にヒットした。久間氏は、三菱電機の人工網膜 LSI が思いのほか売れなかった理由を「はや過ぎた」[6]と結論付けている。

第 2 の応用は、“リアルタイム処理ができる”というポイントと密接に結びついている。当時は、画像処理機能を用いジェスチャー認識をおこなった。ジェスチャーによるインタラクティブゲーム（EX. 槍投げなど）が、ゲームセンターに入った。また、2001 年には、SONY のゲーム機 PlayStation2 対応であるコナミのガンシューティングゲームソフトの周辺機器としても採用された[6,19]。このゲームは、ジェスチャー認識を用い、撃って、避けることができるゲームであった。

第 3 の応用は、“情報量を減らしている”というポイントと密接に結びついている。セキュリティでは、画像の情報量を減らして送っている。ポイントは情報量の少ない画像を送るという点と、カメラをネットワークで繋ぐ点である。当時は、生体における処理のように重要な情報のみに絞ることで情報量を減らすか、MPEG³⁹のように全体の情報を圧縮するか、のどちらかであった。人工網膜 LSI は前者を採用したが、後者の方が世の中の主流となった。

紆余曲折はあったものの、1998 年にスタートした人工網膜 LSI 事業は前述したようにその規模を指数関数的に拡大していった。世界初 CMOS センサの本格的量産と新規市場開拓が目に見える成果となっていったことがグループ内の原動力になったと考えられる。人工網膜 LSI 事業化と新規市場開拓段階における重要な意思決定とモチベーション要因は、下記のものであったと久間氏は述べている[9]。

－ 重要な意思決定 －

- ① 当時 30 名くらいになっていた部隊を二分して、その半分を連れて半導体事業本部に移動。半導体事業本部内に人工網膜 LSI 事業推進プロジェクトを創設。残りの半分は、次の開発部隊として開発本部に残したこと。
- ② 自ら製品設計をおこなうとともに顧客開拓、市場開拓を推進したこと。

－ モチベーション要因 －

- ① 自ら提案し開発した製品は自らの手で事業化したかったこと。
- ② 企業の中では、研究開発部門よりも事業部門が主役であると考えていたこと。

人工網膜 LSI 事業は世界初 CMOS センサの本格的量産以降、順調に新規市場開拓をおこない販売数量も着実に伸ばしていくことになった。

³⁸ 写メール：カメラ付き携帯電話を用いて撮影した画像を電子メールに添付して送信するサービス【J-フォン（現ソフトバンクモバイル）の商標（第 4632735 号）】。

³⁹ MPEG（Moving Picture Experts Group）：映像や音声の圧縮方式の一つで、画像の中の動く部分だけを検出し保存するなどしてデータを圧縮している。

5. ルネサス分社

2003年に人工網膜LSI事業は大きな転機を迎える。三菱電機と日立製作所の半導体部門の事業統合によって設立された新しい半導体専門会社の誕生によって、人工網膜LSI事業はハードウェアとソフトウェアが分離されることとなった。新会社であるルネサステクノロジー株式会社（現：ルネサスエレクトロニクス株式会社）は、主にCMOSイメージセンサやカメラモジュールなど、システムLSI・マイコンを中心としたハードウェアソリューションに特化した。ルネサステクノロジーの誕生の沿革は下記の通りである。


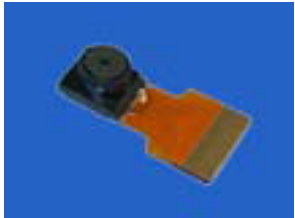
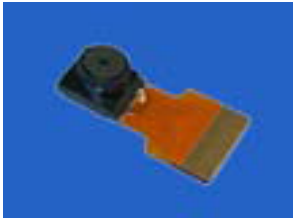
2002年03月18日：日立製作所と三菱電機でシステムLSIなどの事業を
統合する方針で基本合意[20]

2002年10月03日：「株式会社ルネサステクノロジー（Renesas Technology Corp.）」
を社名とすることを正式発表[21]

2003年04月01日：三菱電機と日立製作所から
半導体事業（一部を除く）を承継する新会社として設立

また、当時のルネサステクノロジーのモバイルカメラ・ラインナップを示すと表8となる。

表8：ルネサス・モバイルカメラ・ラインナップ[5]

	M64276E-10	M64278E-800/-10	M64286E-XX
モジュールタイプ			
画素数	CIF (352*288)	VGA (640*480)	VGA (640*480)
特徴	エッジ強調機能 2D から 1D への射影機能	エッジ強調機能 2D から 1D への射影機能	エッジ強調機能 2D から 1D への射影機能
	出力レベル調整, ゲイン調整 ガンマ補正回路, 色補正回路 CIF から QCIF への解像度変換 フリッカイス除去機能 自動露光調整オートホワイトバランス JPEG エンコード / デコード	出力レベル調整, ゲイン調整 ガンマ補正回路, 色補正回路 VGA から CIF への解像度変換 フリッカイス除去機能 自動露光調整オートホワイトバランス 電子ズーム JPEG エンコード / デコード (I-10)	出力レベル調整, ゲイン調整 ガンマ補正回路, 色補正回路 VGA から CIF への解像度変換 フリッカイス除去機能 自動露光調整オートホワイトバランス 多段階電子ズーム
	電源電圧: 2.85V +/- 0.1V(AR,ASIC-IO) 1.8V +/- 0.1V(ASIC-core) 消費電力: 44mW フレームレート: 14fps	電源電圧: 2.85V +/- 0.1V(AR,ASIC-IO) 1.8V +/- 0.1V(ASIC-core) 消費電力: 60mW (M64278E-800) フレームレート: 15fps	電源電圧: 2.85V +/- 0.1V(AR,ASIC-IO) 1.8V +/- 0.1V(ASIC-core) 消費電力: 60mW フレームレート: 15fps

一方、三菱電機は、家電・車載・ビルセキュリティなど社内の主要事業に展開を図るなど、画像認識研究は識別アルゴリズムの製品向けアプリケーションに特化した。現在、三菱電機ではこれらの研究開発を先端技術総合研究所（兵庫県・尼崎市）[22]にておこなっており、家電向け・FA⁴⁰向け・車載向け・医療装置向けを中心とした社内事業化を推進している。ルネサス分社における重要な意思決定は、下記のものであったと久間氏は述べている[8]。

－ 重要な意思決定 －

- ① 当時の半導体事業本部の上層部は、半導体チップに内蔵するアルゴリズム（SW：ソフトウェア）の価値をあまり評価していなかったため、アルゴリズム部隊は三菱電機・開発本部に残すこととし、ハードウェアとしての人工網膜 LSI 事業は親会社として支援する体制にしたこと。

※ルネサス分社の1年前（2002年04月）に、久間氏は開発本部・先端技術総合研究所（システム技術部門長）に異動していた

- ② 開発本部にいた人工網膜 LSI 設計者（HW：ハードウェア）をルネサスに移したこと。

ルネサス テクノロジは、2003年04月に日立製作所と三菱電機の半導体部門の事業統合によって設立された。大きな事業再編の結果、人工網膜 LSI 事業は、ハードウェアのルネサス、ソフトウェアの三菱電機に分断された。三菱電機によるハードウェアとソフトウェアを融合した人工網膜 LSI 事業は、ここで一旦終焉を迎えることになった。

⁴⁰ FA（Factory Automation）：コンピュータ制御技術を用いて工場を自動化すること若しくは生産工程の自動化を図るシステム・機器。

6. 人工網膜 LSI 事業の成功要因・反省要因

ここでは、これまでの内容を踏まえた上で、人工網膜 LSI 事業の成功要因・反省要因について考えていくことにする。具体的には、研究開発・市場投入などのタイミング、三菱電機の DNA との適合性、人工網膜 LSI（英語名：MITSUBISHI・CMOS Image Sensor [Artificial Retina LSI]）[23]という名称の主要な3つの観点から見ていくことにする。

第1に、研究開発・市場投入などのタイミングの観点から見ていく。田中氏は「(人工網膜 LSI の開発と市場投入が) 10 年早かった (時代の先を行きすぎた)」ということを一橋大学イノベーション研究センターにおける講演[5]とインタビュー[23]のなかで繰り返し述べていた。久間氏も同様のことをインタビュー[6]で再三再四述べていた。人工網膜 LSI 事業は、研究開発・市場投入などのタイミングの重要性を示唆している。三菱電機は、現在 Wii⁴¹などで人気の加速度計を搭載したゲームを 2000 年頃には人工網膜 LSI を用いて実現し提案しているが、殆ど日の目を見ることはなかった[5]。また、同じ頃に最近需要が伸びつつあるドライブレコーダー⁴²も提案していたが、これも当時は殆ど日の目を見ることはなかった[5]。確かに人工網膜 LSI 事業は一定の成果をあげたことは疑いようがないが、“どんなものにも眼がつけば”という無限の可能性を最大限に活かしたとは必ずしも言えない。

第2に、三菱電機の DNA との適合性の観点から見ていく。人工網膜 LSI の事業化後、三菱電機株式会社元代表取締役社長（2002 年～2006 年）の野間口有氏（現：独立行政法人産業技術総合研究所理事長）は久間氏に対して、「非常に良い発想であったが、三菱電機の DNA にあったかは分からないね」[6]と述べたそうである。これは、三菱電機が B to C よりも B to B の事業が強いことを背景とした発言と考えられる。確かに、B to C を中心に事業を展開している SONY や Panasonic のような電機メーカーが本事業を展開した方が企業の DNA との適合性は高かったのかもしれない。実際、現在 CMOS イメージセンサで当該市場を引っ張っている日本メーカーは、SONY や Panasonic などの B to C を得意とするメーカーである。ただし、本製品を「人工網膜 LSI」の研究開発、さらには事業化という視点から考えれば最先端のサイエンスの実用化に果敢に挑戦する三菱電機の DNA (EX: コーポレートステートメント “Changes for the Better” [24]) に適合しているとも言えるだろう。

第3に、人工網膜 LSI という名称の観点から見ていく。本製品を“人工網膜 LSI”と呼ばれているところに製品の特長が凝縮されていると考えることができる一方で、同時にまたこの命名は製品の機能を限定して印象付ける可能性があるのではないかと著者は当初考えた。そこで、人工網膜 LSI という名前をつけられたことによる“価値 (+)”若しくは“誤解 (-)”が事業に及ぼした影響について久間氏と田中氏にインタビューをしてみた[6,23]。

⁴¹ Wii：任天堂が 2006 年に発売した家庭用の据置型ゲーム機。

⁴² ドライブレコーダー (Drive Recorder)：走行中に起こった衝突や接触などの時点から数十秒映像と速度等のデータを保存・記録する機器のことである。本機器は、事故検証や事故の客観的な分析に用いられている。

その結果、人工網膜 LSI という名前が生み出した“価値 (+)”としては、「最先端技術と認識される」という大きな効果があったことが分かった。顧客も人工網膜 LSI という、丁寧に扱ってくれた。当時は、「人工網膜 LSI とは何か教えてください」という感じで、最初にお客様のところに行く段階では有利であったことが分かった。実際、久間氏は「営業担当者から名前を変えた方が良く、というような話は一切なかった」[6]と述べている。一方、人工網膜 LSI という名前が生み出した“誤解 (-)”としては、人工網膜 LSI を海外に持ち出す時に、医療器具だと思われ税関で止められ説明が大変だったというエピソードを田中氏から伺うことができた[23]。また、当時は「眼に埋め込め込むんですか？」[23]と聞かれたこともあった。このことから、人工網膜 LSI という名前が少なからずとも誤解 (-) を与えたことは認められたが、圧倒的に価値 (+) の方が大きかったことが確認できた。実際、2010年11月16日におこなわれた久間氏へのインタビューのなかで「CMOS 光センサと言った方が良かったのではないか」という著者の質問に対して、久間氏は「我々としては（人工網膜 LSI という名前に）こだわりがある」[6]と回答している。また、田中氏は「（人工網膜 LSI は）良いネーミングだった。興味を引いた。普通の CMOS センサと言うと、CCD の延長線上かと思われて、話を聞いてもらえなかった。このネーミングをつけたことで話を聞いてもらえた。」[23]と述べている。これら久間氏と田中氏の内容からも分かるように、人工網膜 LSI という名前に対する愛着心や拘りが、本事業の原動力となり、成果を上げる一要因になったとも言えるだろう。

最後に、人工網膜 LSI 事業の開発責任者であった久間氏は、人工網膜 LSI 事業の成功要因と反省要因に関して、「人工網膜 LSI が必ずしも当社の事業として成功したとは思っていないが」と前置きしつつ、下記のように述べている[9]。

－ 成功要因 －

- ① 安価な超小型カメラが必要なマルチメディア時代に不可欠なデバイスであったこと。
- ② 人工網膜 LSI をシリコン CMOS 技術で実現したこと。
- ③ 人工網膜 LSI というハードウェア単体ビジネスでなく、ソフトウェアを搭載したモジュールビジネス、つまり、顧客にソリューションを提供するビジネスに価値を置いたこと。
- ④ 研究所時代から優れた人材を集めて、小さな組織ながらも、デバイス物理、アナログ設計、デジタル設計、モジュール設計、ソフトウェア、アルゴリズムなど様々な分野での一流の技術を持つプロ集団を育成したこと。

－ 反省要因 －

- ① 携帯機器搭載カメラ、ジェスチャー認識ゲーム、ネットワークカメラなどすべてにおいて、市場投入のタイミングが早すぎたこと。

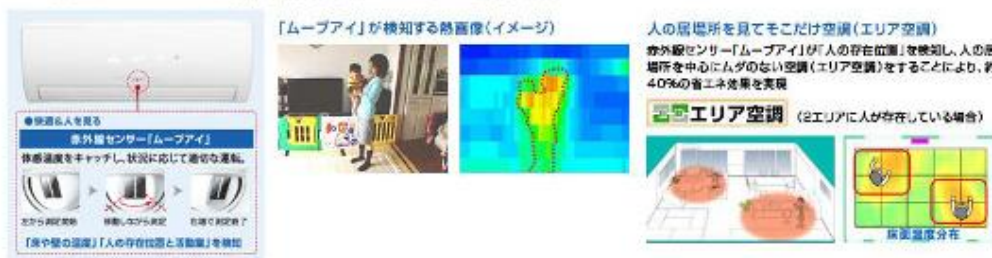
- ② （研究開発段階の三菱電機は） CCD 事業を有していないため，撮像デバイスに関する基盤技術がなかったこと．具体的には，高解像度化，小画素化に伴う雑音除去技術開発に苦戦した．

これまで述べてきたように，人工網膜 LSI 事業には幾つかの成功要因・反省要因があったと考えられる．この成功要因・反省要因を基に，人工網膜 LSI 事業のあるべき姿の一つを模索することが可能である．ただし，人工網膜 LSI 事業は時代とともにリアルタイムでビジネスを展開していたということを考慮した上で，視座・視野・視点を十分に吟味し考えることが非常に重要と言える．なぜなら，実際に事業をしている段階では不確定な未来を予想することは極めて困難である．本事例を基に様々なケースを想定した上で，経営資源であるヒト・モノ・カネ・情報を念頭に置き，戦略や戦術に関する議論をおこない，自身が意思決定者であった場合にどのような方法が最善であったのかを熟慮して頂きたい．

7. おわりに

本稿で記載した人工網膜 LSI 事業は、少なくとも主要な 3 つの意義があった。第 1 に、三菱電機の人工網膜 LSI 事業によって、世の中の CMOS センサという市場が立ち上がった点が挙げられる。第 2 に、人工網膜 LSI 事業に端を発したソフトウェアは、現在も様々な分野で利用されている点が挙げられる。例えば、図 31 で示した家庭用ルームエアコン（ルームエアコン霧ヶ峰ムーブアイ Navi）は既に事業化展開済みであり、図 32 で示した連想記憶を利用した顔認証への応用[26,27]も研究開発の形で検討中である。そして第 3 に、“人工網膜 LSI”という名称も含めて開発リーダーである久間氏の強いリーダーシップや本事業

●人感ムーブアイ(熱画像解析)による空調制御



●弊社家庭用ルームエアコンのセンサ利用による省エネ率向上

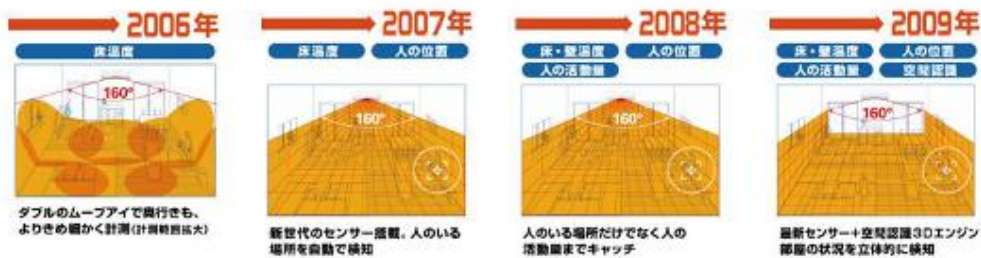


図 31：家庭用ルームエアコンへの展開—熱画像解析による人検知—[25]

●従来のパターン(顔)照合の限界

(1)照明変動・顔向き変化は許容範囲を超えると対応困難



(2)マスク・サングラス等部分隠れは対応困難



●連想記憶で何が出来るか

⇒複数の顔画像を入力、出力画像に等しくなるように連想記憶学習を行う
(入力)マスク・サングラス等隠蔽された部分を含む顔画像
(出力)元画像に近い想起結果(右図例)

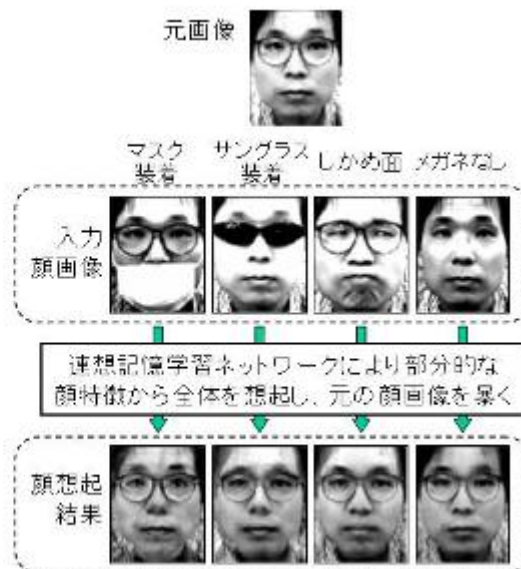


図 32：連想記憶を利用した顔想起—犯人の素顔を暴く顔照合システムの実現に向けて—[26]

にかける夢とも言える強い想いとメンバーの圧倒的な当事者意識により困難な最先端技術の事業化の実現した点が挙げられる。人間の眼は、「センサであると同時にプロセッサ」である。これを人工的に作りだしたものが、まさに“人工網膜 LSI”であったと言える。

ここで、本事業のリーダーであった久間氏のリーダーシップを整理しておきたい。三菱電機の長い歴史のなかで、新しい事業を起こすのに、研究所から事業部に束で人材が移動したというのは“人工網膜 LSI”の事業が先にも後にも最初で最後であった[6]。人工網膜 LSI 事業化の決定後、久間氏は当時研究所にいた 30 人のメンバーのうち、15 名を事業部に連れていったが、拒否する者は一人もいなかった。本事業に携わったメンバーの多くは、今でも本領域で活躍している。ルネサスに残った人達は、カメラ用 CMOS センサ事業を担当している。そして、メンバーの一部は SONY や Panasonic に移り、各社での CMOS センサ事業を支えている。当時、三菱電機の人工網膜 LSI の事業に携わったメンバーが今でも日本の CMOS センサの中核を担っている。これらの人材の多くは久間氏が自ら集めた人材であり、今日でも交流があることから当時から深い信頼関係が構築されていたと言える。

久間氏は、研究所でグループマネージャーになった段階から人工網膜 LSI の事業に携わるメンバーを大学や社内から一人ひとり集めていった。久間氏は、ニューロチップ、人工網膜 LSI を研究する前は光ファイバーセンサの研究をしていた。その過程で様々な領域で学会活動し、数多くのコネクションを形成していった。久間氏自身が一流の研究者であったこともネットワーク拡大を大きく助けた。情報幾何学の創始者とも言える甘利俊一氏（現：東大名誉教授、独立行政法人理化学研究所脳科学総合研究センター顧問）は、「川人光男氏（現：株式会社国際電気通信基礎技術研究所 脳情報通信総合研究所所長）とともに久間氏は、日本のニューロを背負う人材のひとり」[6]と述べたそうである。久間氏は、光デバイス分野で化合物の先生と、光ファイバーで通信の先生と、ニューロの分野で情報や数理科学の先生と知り合いになった。加えて、シリコンの分野で LSI の先生と知り合いになった。久間氏という類いまれなるリーダーがリーダーシップ、各専門分野に特化したスペシャリストのフォロワーがフォロワーシップを最大限発揮し、自律分散協働型の側面を活用した組織が形成された結果、人工網膜 LSI は多大なる成果を上げることができた。

本ケースは、人工網膜 LSI を 4 つの段階に分けて議論してきた。第 1 段階が、光ニューロチップ開発である。第 2 段階が、人工網膜 LSI 開発である。第 3 段階が、人工網膜 LSI 事業化と新規市場開拓である。第 4 段階が、ルネサス分社である。人工網膜 LSI を時系列で振り返ることで、様々な示唆を提示することができた。加えて、人工網膜 LSI の時系列を踏まえた上で、人工網膜 LSI 事業の成功要因・反省要因に関する内容を提示した。

ここで改めて人工網膜 LSI 事業を振り返ることで、研究開発・市場投入などのタイミングの重要性に関する議論をすることができる。多くの場合は、研究開発・市場投入が遅れることで後塵を拝することがある。これに対し、人工網膜 LSI は研究開発・市場投入が早すぎた結果、人工網膜 LSI の潜在的可能性よりも成果が低かったと考えることもできる。何れの事業に置いても研究開発・市場投入のタイミングは極めて重要な領域であり、人工

網膜 LSI が数多くの示唆を与えてくれる。現在、人工網膜 LSI の関連技術は、数多くの分野で使用されていることから、本研究が重要であったことは疑いの余地が無い。

久間氏は、人工網膜 LSI 事業を踏まえ、新事業構築の 3 つの条件を提示している[5]。第 1 に、「概念形成とその実証」という“わざ”と「性能向上、生産性」という“力”の両立を挙げている。第 2 に、ビッグビジネスをつくるための市場開拓を挙げている。第 3 に、組織の壁、保守的風土への挑戦を挙げている。新事業構築には、「概念形成とその実証」のみに満足しないことに加え、自ら市場開拓をおこなう意欲が重要となってくる。人工網膜 LSI 事業は、特に“わざ”と“力”が大きな役割を果たした。人工網膜 LSI 事業における“わざ”とは、「カメラ機能とプロセッサ機能を兼ね備えた知的 LSI という新しいコンセプトを形成した概念形成とその実証」である。一方、人工網膜 LSI 事業における“力”とは、「低雑音化への取り組みとしての埋め込みフォトダイオード や雑音除去回路を開発するなどの性能向上、生産性のこと」である。

三菱電機は、人工網膜 LSI 事業を踏まえ、半導体事業の特徴と課題を次のように考えている[5]。半導体事業の成功は下記の要因が重要となる。

半導体事業の成功 =

(超微細加工技術) & (システム技術) & (サポート技術) & (投資のタイミング)

※4 つの要因のどれかが欠けても成功しない

この関係を基に、日本の半導体産業の凋落を見ると次のようなことが言える。DRAM (: Dynamic Random Access Memory) には、最先端微細加工技術の追求、継続的設備投資が必要であるが、継続的設備投資ができていない。また、システム LSI には最先端プロセスと設計 IP (: Intellectual Property) が重要であるが、システム力 (ソリューション提案力、設計 IP 開発力) が弱い。一方、アメリカの半導体メーカーである Intel Corporation (以下、Intel) のビジネスの成功には、IP・アーキテクチャとプロセス技術に加え、Intel の MPU と Microsoft Corporation の OS (: Operating System), デファクト化が大きな寄与している。半導体事業を考える場合には、超微細加工技術、システム技術、サポート技術、投資のタイミングに注目する必要があるという示唆を人工網膜 LSI 事業が与えている。

最後に、人工網膜 LSI は類いまれなる特異な事例であったことも忘れてはならない。人工網膜 LSI は、研究から販売までの全ての工程を久間氏が中心となりおこなった。また、人工網膜 LSI 事業に携わった主要なメンバーの大半は久間氏がスカウトしてきた。本事例は、研究所のメンバーが基礎研究、応用研究、生産・販売までライフサイクルの全ての段階において主体的に関わったという点で極めて革新的と言える。企業・組織における最大の成功要因 (KFS : Key Factor for Success) の議論をすると、本ケースの著者の経験上最も多く上がる答えが「人」若しくは「モデル」である。“人工網膜 LSI”事業を「人」と「モデル」という切り口から見ても興味深いという知見を最後に記して本ケースの結びとする。

主要参考文献・主要参考 Web サイト

- [1] 三菱電機株式会社, 『有価証券報告書 - 第 140 期 (平成 22 年 04 月 1 日 - 平成 23 年 03 月 31 日)』, 2011 年 06 月 29 日
- [2] 三菱電機株式会社, “三菱電機 会社概要 ヒストリー”, ヒストリー (2011 年 02 月 18 日時点), <http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/gaiyo/history/index.html>
- [3] K. Kyuma, E. Lange, J. Ohta, A. Hermanns, B. Banish and M. Oita, “Artificail retinas-fast versatile image processors”, *Nature, London*, Vol.372, No.6502(1994), pp.197-198
- [4] 有馬朗人監修, 『研究力【久間和生, 「基礎研究とビジネスの両面でパイオニアをめざせ!」, pp.251-287】』, 東京図書, 2001 年 05 月 25 日
- [5] 田中健一, “[GCOE 大河内賞ケース研究プロジェクト講演会]人工網膜 LSI の開発と事業化”, 一橋大学イノベーション研究センター(東京都国立市中 2-1), 2010 年 09 月 21 日
- [6] 久間和生氏へのインタビュー, 三菱電機株式会社 本社 (東京都千代田区丸の内二丁目 7 番 3 号), 2010 年 11 月 16 日
- [7] J.J.Hopfield, “Neural network and physical systems with emergent collective computational abilities”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 79 (8): 2554-8, 1982 年
- [8] 佐藤銀平, 『独創者列伝 IT 革命の礎を築いた日本人』, NTT 出版, 2005 年 10 月 07 日
- [9] 久間和生氏へのメールによる質問回答, 2010 年 11 月 22 日
- [10] “Home Security System” in the article of “The 10 Smartest Machines”, *TIME Asia*, vol.155, pp.40, 2000 年
- [11] 長澤紘一・久間和生ら, “人工網膜 LSI の開発と事業化”, 第 46 回大河内記念技術賞, 2000 年 03 月 08 日
- [12] 原武士, “ASCII.jp : リコーエレメックス 誰でも簡単に使える キーボード・マウスを使わない新しい入力機器を発表”, *ASCII.jp*×デジタル (2011 年 02 月 18 日時点), <http://ascii.jp/elem/000/000/315/315709/>, 1999 年 04 月 23 日更新
- [13] “Game Boy Camera - Wikipedia, the free encyclopedia”, *Wikipedia* (2011 年 09 月 03 日時点), http://en.wikipedia.org/wiki/Game_Boy_Camera, 2011 年 08 月 28 日更新
- [14] 携帯電話ニュース, “ツーカーグループ 3 社 専用デジカメで撮影した画像を送受信可能な携帯電話発表”, *Mobilenews* (2011 年 02 月 18 日時点), <http://www.mobilenews.ne.jp/news/1999/04/1203tuka.html>, 1999 年 04 月 12 日
- [15] ケータイ Watch 編集部, “ケータイ Watch ケータイ新製品 SHOW CASE J-フォン J-D05”, *ケータイ Watch* (2011 年 02 月 18 日時点), http://k-tai.impress.co.jp/cda/article/showcase_top/5613.html, 2001 年 08 月 02 日
- [16] ケータイ Watch 編集部, “ケータイ新製品 SHOW CASE J-フォン J-SA05”, *ケータイ Watch* (2011 年 02 月 18 日時点),

http://k-tai.impress.co.jp/cda/article/showcase_top/12293.html, 2003年01月20日

[17] ケータイ Watch 編集部, “ケータイ新製品 SHOW CASE NTT ドコモ N504iS”, ケータイ *Watch* (2011年02月18日時点),
http://k-tai.impress.co.jp/cda/article/showcase_top/11837.html, 2002年11月27日

[18] 株式会社 毎日コミュニケーションズ, “ゲーセンでパラパラ? 人工網膜センサ搭載の画期的ダンスゲーム登場!! | ネット | マイコミジャーナル, マイコミジャーナル (2011年02月18日時点), <http://journal.mycom.co.jp/news/2000/07/11/16.html>, 2000年07月11日

[19] “ザ・警察官 – Wikipedia”, *Wikipedia* (2011年02月18日時点),
<http://ja.wikipedia.org/wiki/ザ・警察官>, 2011年04月04日更新

[20] 株式会社ルネサス テクノロジ, “日立と三菱がシステム L S I 事業の統合に向けて基本合意”, *ニュースリリース / ルネサス エレクトロニクス : 2002年03月18日* (2011年02月18日時点),
http://japan.renesas.com/company_info/news_and_events/press_releases/press_release20020318.jsp, 2002年03月18日

[21] 株式会社ルネサス テクノロジ, “日立製作所と三菱電機が半導体新会社 ルネサス テクノロジの設立について基本合意”, *ニュースリリース / ルネサス エレクトロニクス : 2002年10月03日* (2011年02月18日時点),
http://japan.renesas.com/company_info/news_and_events/press_releases/press_release20021003.jsp, 2002年10月03日

[22] 三菱電機株式会社, “三菱電機 研究開発・技術 研究開発 研究所紹介 先端技術総合研究所”, *先端技術総合研究所* (2011年02月18日時点),
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/laboratory/advanced_technology/index.html

[23] 田中健一氏へのインタビュー, *三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 (兵庫県尼崎市塚口本町八丁目1番1号)*, 2010年12月20日

[24] 三菱電機株式会社, “三菱電機 会社概要 企業理念”, *企業理念* (2011年02月18日時点), <http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/gaiyo/rinen/index.html>

[25] 三菱電機株式会社, “三菱電機 CSR の取組 環境特集 エアコンのエコは新次元へ 開発者が語る「センシング&解析」の奥義”, *開発者が語る「センシング&解析」の奥義* (2011年02月18日時点),
http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/eco_sp/aircon/heart/index.html

[26] 鹿毛裕史・渡邊信太郎・田中健一・久間和生, “自己連想記憶を利用した顔認証方式の性能評価”, *電子情報通信学会研究報告*, NC, 106(102), pp.47-52, 2006年06月09日

[27] 生田剛一・鹿毛裕史・鷺見和彦・田中健一・久間和生, “自己組織化を用いた顔画像からの性別・世代推定”, *電子情報通信学会研究報告*, NC, 107(413), pp.121-126, 2008年01月08日

II R ケース・スタディ 一覧表／2004-2011
(MOT プログラムケース、大河内賞ケースのみ抜粋)

NO.	著 者	タ イ ト ル	発行年月
CASE#04-01	坂本雅明	「東芝のニッケル水素二次電池開発」	2003 年 2 月
CASE#04-02	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(1): 自動販売機—自動販売機業界での成功要因」	2004 年 3 月
CASE#04-03	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(2): 自動販売機—新たなる課題への挑戦」	2004 年 3 月
CASE#04-04	高梨千賀子	「富士電機リテイルシステムズ(3): 自動販売機—飲料自販機ビジネスの実態」	2004 年 3 月
CASE#04-05	伊東幸子 青島矢一	「ハウス食品: 玉葱催涙因子合成酵素の発見と研究成果の事業化」	2004 年 3 月
CASE#04-06	青島矢一	「オリンパス光学工業: デジタルカメラの事業化プロセスと業績 V 字回復への改革」	2004 年 3 月
CASE#04-07	堀川裕司	「東レ・ダウコーニング・シリコン: 半導体パッケージング用フィルム状シリコン接着剤の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-08	田路則子	「日本開閉器工業: モノづくりから市場創造へ「インテリジェントスイッチ」」	2004 年 3 月
CASE#04-09	高永才	「京セラ: 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2004 年 3 月
CASE#04-10	坂本雅明	「二次電池業界: 有望市場をめぐる三洋、松下、東芝、ソニーの争い」	2004 年 3 月
CASE#04-11	三木朋乃	「前田建設工業: バルコニー手摺一体型ソーラー利用集合住宅換気空調システムの商品化」	2004 年 3 月
CASE#04-12	尹諒重 武石彰	「東洋製罐: タルク缶の開発」	2004 年 3 月
CASE#04-13	藤原雅俊 武石彰	「花王: 酵素入りコンパクト洗剤「アタック」の開発」	2004 年 10 月
CASE#04-14	軽部大 井森美穂	「オリンパス: 超音波内視鏡の構想・開発・事業化」	2004 年 10 月
CASE#04-15	軽部大 小林敦	「三菱電機: ポキポキモータ 新型鉄心構造と高速高密度巻線による高性能モーター製造法の開発」	2004 年 11 月

CASE#05-01	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(1): 組織風土の改革プロセス」	2005年2月
CASE#05-02	青島矢一 宮本圭介	「テルモ(2): カテーテル事業の躍進と今後の課題」	2005年2月
CASE#05-03	青島矢一 河西壮夫	「東レ(1): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の技術開発」	2005年2月
CASE#05-04	青島矢一 河西壮夫	「東レ(2): 東レ炭素繊維複合材料“トレカ”の事業戦略」	2005年2月
CASE#05-05	兒玉公一郎	「ヤマハ(1): 電子音源に関する技術蓄積」	2005年2月
CASE#05-06	兒玉公一郎	「ヤマハ(2): 携帯電話着信メロディ・ビジネスの技術開発、ビジネスモデル構築」	2005年2月
CASE#05-07	坂本雅明	「二次電池業界(改訂): 技術変革期における新規企業と既存企業の攻防」	2005年2月
CASE#05-08	高永才	「京セラ(改訂): 温度補償水晶発振器市場における競争優位」	2005年2月
CASE#05-10	坂本雅明	「東北パイオニア: 有機ELの開発と事業化」	2005年3月
CASE#05-11	名藤大樹	「ハイビジョンプラズマディスプレイの実用化 プラズマディスプレイ開発協議会の活動を中心に」	2005年7月
CASE#05-12	武石彰 金山維史 水野達哉	「セイコーエプソン: 自動巻きクォーツ・ウォッチの開発」	2005年7月
CASE#05-13	北澤謙 井上匡史 青島矢一	「トレセンティテクノロジーズによる新半導体生産システムの開発 —300mm ウェハ対応新半導体生産システムの開発と実用化—」	2005年10月
CASE#06-01	武石彰 高永才 古川健一 神津英明	「松下電子工業・電子総合研究所: 移動体通信端末用 GaAs パワーモジュールの開発」	2006年3月
CASE#06-02	平野創 軽部大	「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九: 革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現 大ブロックリング工法の開発」	2006年8月

CASE#07-01	武石彰 宮原諄二 三木朋乃	「富士写真フイルム： デジタル式 X 線画像診断システムの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-02	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(A):事業の立ち上げと技術課題の克服」	2007 年 7 月
CASE#07-03	青島矢一 鈴木修	「ソニー： フェリカ(B):事業モデルの開発」	2007 年 7 月
CASE#07-04	武石彰 伊藤誠悟	「東芝： 自動車エンジン制御用マイコンの開発」	2007 年 8 月
CASE#07-05	青島矢一 朱晋偉 吳淑儀	「無錫小天鵝株式会社： 中国家電企業の成長と落とし穴」	2007 年 8 月
CASE#07-06	青島矢一	「日立製作所： LSI オンチップ配線直接形成システムの開発」	2007 年 9 月
CASE#07-07	坂本雅明	「NEC： 大容量 DRAM 用 HSG-Si キャパシタの開発と実用化」	2007 年 9 月
CASE#08-01	小阪玄次郎 武石彰	「TDK： 積層セラミックコンデンサの開発」	2008 年 1 月
CASE#08-02	福島英史	「東京電力・日本ガイシ： 電力貯蔵用ナトリウム—硫黄電池の開発と事業化」	2008 年 3 月
CASE#08-03	青島矢一 北村真琴	「セイコーエプソン： 高精細インクジェット・プリンタの開発」	2008 年 5 月
CASE#08-04	高梨千賀子 武石彰 神津英明	「NEC： 砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発」	2008 年 9 月
CASE#08-05	小阪玄次郎 武石彰	「伊勢電子工業： 蛍光表示管の開発・事業化」	2008 年 9 月
CASE#09-02	青島矢一 大倉健	「荏原製作所： 内部循環型流動層技術の開発」	2009 年 6 月

CASE#09-03	藤原雅俊 積田淳史	「木村鑄造所： IT を基軸とした革新的フルモールド鑄造システムの開発」	2009 年 7 月
CASE#10-01	工藤悟志 清水洋	「東芝： 0.6μ m帯可視光半導体レーザの開発」	2010 年 1 月
CASE#10-02	山口裕之	「東レ： 非感光ポリイミド法に基づくカラーフィルターの事業化と事業転換」	2010 年 3 月
CASE#10-03	三木朋乃 積田淳史 青島矢一	「NHK 放送技術研究所・NHK エンジニアリングサービス・日本ビクター株式会社： 話速変換技術を搭載したラジオ・テレビの開発」	2010 年 4 月
CASE#10-04	青島矢一 高永才 久保田達也	「日本電気： 最先端 LSI 量産を可能にした ArF レジスト材料の開発」	2010 年 5 月
CASE#10-05	青島矢一 大久保いづみ	「新日本製鐵： コークス炉炭化室診断・補修技術」	2010 年 7 月
CASE#10-06	久保田達也 青島矢一	「横河電機： 高速共焦点顕微鏡の開発と事業化プロセス」	2010 年 7 月
CASE#10-07	工藤秀雄 延岡健太郎	「パナソニック： IH 調理器の開発」	2010 年 7 月
CASE#10-08	今井裕介 岩崎慶 幸務正 鈴木裕一郎 山田将知	「株式会社高井製作所の組織改革」	2010 年 7 月
CASE#10-09	工藤悟志 清水洋	「ソニー： MOCVD 法による化合物半導体デバイスの開発と量産化」	2010 年 8 月
CASE#10-10	積田淳史 藤原雅俊	「中田製作所： 高機能造管成形機の開発と実用化」	2010 年 9 月
CASE#11-01	伊藤誠悟	「株式会社デンソー： 自動車用発電機：Ⅲ型オルタネータの開発・事業化」	2011 年 4 月
CASE#11-03	小室匡史 江藤学	「三菱電機株式会社： 人工網膜チップの開発と事業化」	2011 年 9 月

CASE#11-04	奥村祐一郎 江藤学	「セイコーエプソン株式会社：3LCD プロジェクタ開発と事業化」	2011 年 9 月
------------	--------------	----------------------------------	------------