

一橋大学 21 世紀 COE プログラム  
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」  
大河内賞ケース研究プロジェクト

NEC  
砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発

高梨千賀子  
武石彰  
神津英明

2008 年 9 月

CASE#08-04

---

本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」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(詳細は <http://www.iir.hit-u.ac.jp/research/21COE.html> を参照のこと)。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。

※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  
文部科学省 21 世紀 COE プログラム  
「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」  
大河内賞ケース研究プロジェクト

NEC  
砒化ガリウム電界効果トランジスタの開発

2008/09/03

立命館大学 MOT 大学院テクノロジー・マネジメント研究科准教授 高梨千賀子  
京都大学大学院経済学研究科教授 武石彰\*  
元・一橋大学イノベーション研究センターCOE 客員教授 神津英明

\*〒606-8501 京都市左京区吉田本町  
電話：075-753-3426 ファックス：075-753-3492  
電子メール：takeishi@econ.kyoto-u.ac.jp



## 1. はじめに

我々の身の回りの空間を大量の情報が高速で行き来している。目にすることも、耳にすることもできないが、無線通信の世界がそこにある。

無線通信 (Wireless Communication) とは伝送経路として線 (Wire) を使わない通信のことをいう。その長い歴史の中で、モールス信号、ラジオ、テレビなど、新たな技術が登場するたびに無線通信は我々の生活と社会を大きく変えてきた。携帯電話やコンピュータを端末とする無線通信が普及浸透し、そこにインターネットや放送が結びつくにつれて、いままた新しい世界が築かれ、広がろうとしている。

無線通信の媒体は電波などの電磁波である<sup>1</sup>。電磁波は波として一定のサイクルを繰り返しており、1秒間に何回繰り返されるかを示す数値が「周波数」である。周波数帯はそれぞれに性質が異なっており、電波法によって性質に適した用途が割り振られている。原理的には周波数の高さ (波=サイクルが多い) とその幅 (波の大きさ) に応じて単位時間に伝送される情報量は変わり、周波数が高いほどより多くの情報量を伝えることが可能になる。無線通信の歴史は、周波数帯域を広げ、かつ、高出力・低雑音を実現することによって、より大量の情報をより正確に、より遠方に、そしてより安価に伝達するための技術革新を積み重ねてきた歴史であった。

この無線通信の技術革新の歴史に、1974年に砒化ガリウム電界効果トランジスタ (以下、GaAs MES FET) の市販化に成功したことで名を刻んだのがNEC<sup>2</sup>であった。

GaAs MES FETは砒化ガリウム (GaAs) という化合物を材料とした半導体素子で、電界効果を引き出して電流の流れを制御する電界効果トランジスタである。GaAsは、当時半導体材料として主に使われていたシリコンに比べて電子の移動速度が3倍速いといった特性をもっていることから高周波通信に適しており、NECが本格的な実用化に成功すると、電磁波の中でもマイクロ波という高い周波数帯用の通信機器の心臓部である送・受信部に使われるようになった。その応用分野は、地上電話回線やレーダーなどの既存分野から、やがては衛星放送や移動体通信といった当時芽生えたばかりの新分野にも拡大した。

GaAs MES FETの原理そのものは、すでに1966年にアメリカの研究者C. A. Meadによって提案されており、30社を超える世界中の名だたる企業がこぞってその実用化に取り組んでいた。しかし開発・量産化が非常に困難であったため、どれも成功には至らなかった。この困難を乗り越え世界に先駆けて製品化したのが、GaAs MES FETの開発では後発であったNECであった。NECはどのようにしてGaAs MES FETを製品化していったのだろうか。この

---

<sup>1</sup> 電磁波は周波数に応じて光や電波などに分けられる。物理的には光も電波も電磁波で周波数のある帯域を指しており、光としての性質 (粒子性) と、波としての性質 (波動性) のどちらの性質を利用しているかで区別される。

<sup>2</sup> 現NECエレクトロニクス株式会社。NECでは半導体事業を2002年に半導体専門企業NECエレクトロニクス株式会社として分離独立させた。本稿では、断りがない限り、GaAs MES FETの量産化に成功した当時の社名「日本電気株式会社」の略称である「NEC」を用いる。

NECによるGaAs MES FETの開発・量産化のプロセスを記述するのが本ケースの目的である<sup>3</sup>。

NEC が量産化に成功した GaAs MES FET とはどのようなもので、どのような問題が量産化を困難にしていたのか、それに対して NEC はどのような技術で対応したのか、技術的な記述が多くなるが、まずその説明からはじめることにしよう。

## 2. GaAs MES FET とは？

### GaAs MES FET の特性・構造・用途

GaAs MES FET (Gallium Arsenide Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor、砒化ガリウム電界効果トランジスタ) とは、砒化ガリウム (GaAs) という化合物を材料として用いた半導体デバイスで、電界効果 (Field Effect) を介して電流の流れを制御するトランジスタのことをいう。

半導体とは電気を通す導体や電気を通さない絶縁体に対して条件次第ではそのどちらにもなる物質である。地球には 92 種の元素が存在するが、その中でこのような性質を持った物質は限られている。代表的なのは半金属であるゲルマニウムやシリコンである。ここに微量の不純物を添加すると電気を通しやすくなるが、その量や不純物との組み合わせによって電気の流れ方が変わる。ゲルマニウムやシリコンはひとつの元素で半導体になるため単元素半導体と呼ばれ、導体になるか絶縁体になるかの電気的特性は温度などの条件で変化する<sup>4</sup>。これに対し、元素周期表でいう III 族と V 族、II 族と VI 族、IV 族同士の元素を組み合わせた結晶が「化合物半導体」であり、GaAs MES FET の GaAs (砒化ガリウム) は III 族と V 族の元素を組み合わせた化合物半導体である。

これら半導体は電子回路部品の素子 (デバイス)<sup>5</sup>に使われ、電気信号を処理する。電子回路に使われる素子は、線形素子、非線形二端子素子、三端子素子 (FET、トランジスタなど) に分類される。線形素子は、電圧をかけるとそれに比例する電流が流れる線形特性を持つ素子で、抵抗、コンデンサ、コイル、トランスなどがある。非線形二端子素子は、2 本

---

<sup>3</sup> 本ケースは、一橋大学 21 世紀 COE プログラム「知識・企業・イノベーションのダイナミクス」の研究プロジェクトのひとつ「大河内賞ケース研究プロジェクト」(<http://www.iir.hit-u.ac.jp/research/21COE.html>)の一環として作成したものである。本ケースでとりあげる砒化ガリウム電界効果トランジスタ (GaAs MES FET) の開発・量産化は 1978 年度に第 25 回大河内記念賞を受賞している。本稿を作成するにあたって、後掲の参考文献の他に、入江俊昭氏 (受賞当時、日本電気株式会社半導体事業部超高周波部長) へのインタビュー (2006/8/4) を参考にさせていただいた。お忙しい中、貴重な時間を割いてご協力いただいたことに感謝する。大河内賞ケース研究プロジェクトを進めるに際して多くのご協力をいただいている大河内記念会にも感謝する。なお、書かれている内容についての文責はあくまでも筆者にある。また、本稿の記述は企業経営の巧拙を示すことを目的としたものではなく、分析並びに討議上の視点と資料を提供するために作成されたものである。

<sup>4</sup> たとえば、炭素の単結晶であるダイヤモンドは高温で作動する半導体 (ただし、これを自由に駆使するだけの技術はまだない) であり、錫は低温でこそ半導体の性質を持つが常温では金属として振舞う材料である。

<sup>5</sup> 素子 (device) という言葉は対象とするシステムの構成要素といった意味を持つ。電子回路をシステムとして考える場合はトランジスタ、抵抗、キャパシタなどの回路部品のことを素子という。

の端子（電極）を持つ回路素子で、ダイオードなどがその代表的なものである。二端子素子は、一方向にしか電流を通さないが、交流から直流を作るなど異なる周波数間のエネルギー移動を行うことができ、ある種のエネルギー変換を行うことができるため非線形と呼ばれる。これに対し、三端子素子は、第三の制御電極でもって主端子（2つの電極）間を流れる電流に電圧などの小さな信号を加えて抵抗値を変えて通過する電流を制御する。トランジスタは三端子素子の代表格である。

GaAs MES FET のFET（Field-Effect Transistor：電界効用トランジスタ）は、半導体<sup>6</sup>と、半導体の相対する端面に形成されたソース（電子の発生源）とドレイン（電子の吸い込み口）と呼ばれる2つの主電極と、その間のゲート電極という3つの電極（三端子）から成り立ち、ソースからドレインに向かって流れる電子をゲート電極の電界の力を利用して制御するものである。MESはMetal-Semiconductorの略で、ゲートがショットキー接合（金属と半導体の間で整流作用を示す接合）<sup>7</sup>であることを示す。つまり、GaAs MES FETは、ゲートに金属を直接半導体（GaAs）表面につけたショットキーバリアゲート<sup>8</sup>を用いるFETということになる（NECが市販化したGaAs MES FETの構造は図1を参照のこと）。

GaAs MES FETは、高速動作、低消費電力が求められるマイクロ波領域での高周波増幅を主たる機能とする。

マイクロ波とは、表1に示すように3～30GHzの範囲の電磁波のことであるが、マイクロ波デバイスという場合は、準マイクロ波帯（1～3GHz）<sup>9</sup>を含めた約1GHzから30GHzのより広い周波数帯で使われるデバイスの総称である<sup>10</sup>。増幅とは電流・電圧等の小さな信号を大きな信号にすることである。主な応用分野は、一般家庭向けでは衛星放送受信機、携帯電話、一部のアマチュア無線機など、企業向けとしては衛星通信システム（小型地球局、VSAT）、船舶電話など、また、インフラ向けとしては電話回線幹線系の地上マイクロ波回線、衛星搭載通信回線中継機（トランスポンダ）、携帯電話基地および中継局などである。

GaAs MES FETがマイクロ波送信用のデバイスとしての機能を果たすことができるのは、シリコン半導体では実現できない化合物半導体の特性を有しているためである。それは、GaAsの電子の移動速度がシリコンの3倍と速く、しかも、GaAs MES FETでは半絶縁性

<sup>6</sup> 直方体をしたn型半導体。この半導体では、半導体の中で電流を運ぶキャリア（carrier）が電子である。電子はマイナス（negative）の電気を持っているため、「n型半導体」と呼ばれる。また、半導体には、p型半導体も存在する。p型半導体のキャリアは正孔（電子の空席のようなもの）である。正孔はプラス（positive）の電気を持っているようにふるまう（電子をひきつける）ため、「p型半導体」という。ダイオードやトランジスタの半導体の働きは、このn型半導体とp型半導体を組み合わせることによって生まれる。

<sup>7</sup> pn接合も整流作用を示すが、ショットキー接合は多数のキャリアで電流の輸送が行われるため、高速動作に優れている。ショットキー接合は、GaAs FETのもっとも基本的な構造である。

<sup>8</sup> ショットキーバリアのバリアとは、金属と半導体の接合によって生じる障壁のことであり、ショットキーとは、半導体と金属が接触したときの物理現象を研究した人の名前に由来する。

<sup>9</sup> 周波数が1G～3GHzの範囲にある電磁波。UHF帯と呼ばれる300～3GHzの極超短波の一部である。国内では、1.5GHz帯がPDC方式のデジタル携帯電話の一部で、1.9GHz帯がPHSで利用されている

<sup>10</sup> 三菱電機株式会社技術研修所編「わかりやすい半導体デバイス」p.130。しかし、一般にははっきりとした定義がない（Wikipedia）。

基板の成長が可能で寄生容量を低減でき<sup>11</sup>、高速・高周波動作特性に優れていることである<sup>12</sup>。

電波は周波数が高いほど微弱であり、建物などの障害物があった場合はそこでさえぎられてしまう。高周波のマイクロ波信号の送・受信部を担当するためには、①基本機能として高利得<sup>13</sup>電力増幅機能を有しており、さらに②送信部としては大電力を増幅するために高効率増幅特性が、③受信部としては微弱信号を増幅するために低雑音特性が必要とされる。化合物半導体のGaAs MES FETは、高効率増幅特性においても、低雑音特性においてもシリコンなどの既存のデバイスよりも高い性能を実現することができるのである<sup>14</sup>。

### **GaAs MES FET への期待と技術的障壁**

GaAs MES FET が登場するまで、マイクロ波通信装置の周波数変換、局部発信、増幅、変調を行う回路には、主に、二端子の化合物半導体や三端子のシリコンを使ったバイポーラ・トランジスタが使われていた。しかし、前者は高周波の実現が可能だったが、応用装置の構造が複雑で価格が高く、利用できる範囲が限られていた。また、後者は、価格は安かったものの、周波数は4GHzにとどまっていた。4GHzはマイクロ波通信ができる最低ラインに近かった（前掲表 1）。大容量のデータを少ない雑音（ノイズ）で劣化させずに送るためには周波数を高くする必要があったが、当時の安価なシリコン半導体ではシリコンの物質的特性によって実現できる周波数に制限があったのである。

より大容量のデータをより高速で通信しようとするニーズが高まる中で、より高周波の通信装置が求められ、それを実現するために半導体に新しい材料を用いた三端子素子の開発が切望されていた。そのための有望な技術として注目を集めていたのが、1966年にカリフォルニア工科大学(California Institute of Technology)のC.A.Meadによって提案されたGaAs MES FETであった。ベル研究所、ワトキンスジョンソン、ヒューズ、ヒューレットパッカード、TI、モトローラ、ノーザンテレコム（加）などの欧米の主要企業、そして衛星通信分野などに関わっていた日立、三菱、富士通、東芝を含めて、世界で三十数社の企業がこぞってGaAs MES FETの製品化に取り組んだ。

しかし、GaAs MES FETは化合物半導体としての大きな難点を持っていた。GaAsを高品質

---

<sup>11</sup> 寄生容量とは、配線、検出回路内部や、絶縁体を挟んだ2枚の導電体間に蓄積される静電容量であり、デバイスにとって必要のない電氣的要素である。デバイスの入出力部分において寄生容量が高いと、入力信号や増幅された出力電力がその充放電に使われてしまい、実際に利用される信号は小さくなる。周波数が高くなるにつれ、容量における電力の充放電の回数は周波数に比例するので、デバイスの周波数特性は急激に劣化することになる。

<sup>12</sup> このほか、化合物半導体はシリコン半導体に比し、①発光・受光機能、②耐放射線・耐熱特性、③磁電変換機能に優れている。

<sup>13</sup> 利得とは電気回路における入力と出力の比のこと。

<sup>14</sup> マイクロ波デバイスの性能の良否を示す指標として最大発振周波数がある。それは素子が電力を増幅できる最高の周波数で、アナログ回路の高速動作性能を示す指標。最大発振周波数が高ければ高いほど、高い周波数まで利得を持つ。GaAs MES FETの最大発振周波数はシリコントランジスタのその約10倍であり、GaAs MES FETはシリコントランジスタの10倍高い周波数まで使用可能である。

の結晶に成長させるのが難しいこと、GaAsに適した表面保護膜がない（したがって水分を含む外部雰囲気や、薬品に弱い）ことなどであり、これらの問題がGaAsの実用化を妨げた。研究段階では優れた成果が発表されたものの、特性を安定して再現することは困難を極め、GaAs MES FETの実用化はかなわなかった。多くの企業の努力にもかかわらず製品化の見通しは立たないままだった<sup>15</sup>。

## **NECの革新**

そうした技術的困難を克服し GaAs MES FET の開発・量産化に成功したのが NEC だった。NEC が GaAs MES FET の開発に取り組み始めたのは 1970 年ごろで、内外の他の企業に比べれば着手は遅かったが、4 年後の 1974 年に他社に先駆けて実用化に成功した。

NEC の革新は、単に安定して結晶を成長させる結晶技術だけにはとどまらず、GaAs 特性を引き出すための金属などの素材、製造方法から特性の品質保証システムまで、化合物半導体のデメリットを克服し量産化を可能にする一連の技術から構成されていた。

それは具体的には、①GaAs 結晶成長技術、②オーム性電極とショットキーバリア電極、③写真蝕刻技術、④内部整合化、⑤品質保証技術とそのシステム開発、実用化、⑥技術設計理論の確立、⑦パッケージング技術の 7 つである（表 2 参照）。この内、①GaAs 結晶成長技術は GaAs 結晶を作る要素技術であり、②の電極形成技術、③写真蝕刻技術、④内部整合化技術、⑦パッケージング技術は、GaAs の特性を安定して再現できる MES-FET を作り上げるための技術である。さらに、NEC では、⑤品質保証技術とそのシステム、⑥デバイスの設計理論を確立し、出来具合にばらつきがあった時代に、完成品の品質を保証した。また、⑦のパッケージング技術は商品に付加され、品質保証ツールとしても利用された。

これら 7 つの技術革新を結集して実用化された NEC の GaAs MES FET は、コストの安さと安定した高周波性能の高さによって、当初は、主に 4~6GHz マイクロ波の低雑音増幅器に用いられ、後には衛星通信や衛星放送といった 30 数 GHz のミリ波帯における電力増幅、発振器などに用途を拡大し、マイクロ波周波数帯の様々な既存の技術を代替して、普及していった。

たとえば、GaAs MES FET は衛星通信にそれまで使用されていたパラメトリック増幅器と同程度の特性でコストが 5 分の 1 であったため、それにとって代わった。送信用増幅器では、それまで進行波管が用いられていたが、半導体である GaAs MES FET に置き換わることによって、寿命が半永久的になると同時に、システムの半導体化が進み小型軽量化を実現できた。準ミリ波やミリ波における増幅器では、GaAs MES FET を用いることで直接増幅が可能となり、通信システムの性能向上とコストダウンが可能となった。GaAs MES FET は、4 GHz から 30GHz までの周波数においては発振器としても用いることができたため、それ

---

<sup>15</sup> 1973 年に発行された専門書『個体マイクロ波素子』でも、その序章で、GaAs MES FET には可能性はあるものの、その実用化は流動的であり、章としてはとりあげない、と書かれていた。この本の編者の一人が、当時 NEC の中央研究所の所長だった植之原道之であった。

まで使われていたガンダイオードやインパットダイオードを用いた高価な発振器に置き換わっていった。GaAs MES FET は通信やレーダーといったそれまでの通信分野のみならず、当時は新しい通信システムであった衛星テレビ放送などの分野にも用いられていったのである。

世界の中で先陣を切って実用化に成功した NEC は、GaAs MES FET の分野で国際的な主要メーカーとしての地位を確立していった。NEC はどのようにして化合物半導体の技術的困難を克服し、化合物半導体の特性の再現性を高め、GaAs MES FET の量産化にこぎつけたのであろうか。以下、その経緯をたどることとする。

### 3. NEC での開発着手

#### 事業部での胎動

NEC の半導体事業部超高周波部で GaAs MES FET の製品化にむけて開発がスタートしたのは、1973 年夏ごろのことだった。仕掛けたのは、当時超高周波部超高周波トランジスタ課の課長だった入江俊昭であった。

入江は 1960 年に中途採用で NEC に入社した。東京工業大学電気工学科卒で、電線会社に入社し、4 年ほど同軸ケーブルの開発を担当した後、NEC に転職し、半導体の開発に携わった。大学時代にトランジスタについて独学していた入江は、半導体の開発に関わってみたいと考えて転職したのだった<sup>16</sup>。配属された半導体事業部はちょうど立ち上がったばかりで<sup>17</sup>、入江は助手とわずか 2 人で半導体の開発をスタートさせた。当時、NEC は量産可能な半導体（メモリなど）に注力していたが、入江は、NEC は通信機器メーカーであるのだから通信に注力することが他社との差別化に繋がると考え、通信機器のための半導体を開発したいという思いを抱いていた。

この入江の思いは、1965 年ごろから具体的な動きになった。当時、移動体通信はごく限られた形で利用されていただけだったが、入江は「価格が低下してシステムが簡略化されてサービスが充実してくれば移動体通信は重要な市場に育っていく。その普及の鍵となる技術のひとつが微弱な電波を受送信する技術である」と考えていた。入江はトランジスタ販売の傍ら、移動体通信の研究が日本よりも進んでいる欧米へアプローチを開始し、NEC トランジスタの米代理店の協力の下、海外の研究所などから移動体通信の情報を集めていたのである。

その入江が 1973 年になって GaAs MES FET の開発に積極的に動いたのには、三つの理由があった。第一に、入江はシリコントランジスタの限界を感じ、一方で高周波用半導体の重要性・可能性を認識していた。NEC ではシリコントランジスタの周波数は 4GHz まで応用領域を広げていたが、それ以上周波数を上げることには限界が見えていた。シリコントラ

---

<sup>16</sup> 当時はまだ大学にはトランジスタの研究科はなく、指導教員が入手した米の大学研究者向け雑誌に載っているトランジスタの研究論文を夢中になって読んだ、と入江は振り返っている。

<sup>17</sup> NEC では、1961 年に事業部制を導入、それに伴って、従来の電子部品事業部半導体工場を半導体事業部として独立させた。

ンジスタはnpnという三層構造<sup>18</sup>をなしており、三層をはさんでその特性を出す。しかし、p層の厚さと不純物の濃度という点で、特性を引き出すには製造技術上限界に来ていた。性能を決めるp層の厚さは、薄いと抵抗が上がり、厚いと周波数特性が悪かったからである。

第二に、入江は、GaAs MES FETの研究に取り組んでいた中央研究所が試みた写真触刻技術（後述）の可能性に注目していた。入江は中央研究所とつながりを持っていた。初代中央研究所所長の植之原とは顔見知りであったし、また、入江の上司である半導体事業部長の佐々木は中央研究所出身であった。入江は、彼らを通して、中央研究所のある開発部隊がFET特性の評価用に写真触刻技術を用いたところ、1973年の初め頃になって興味深い成果をあげたことを聞き入れ、この技術をうまく使えばGaAs MES FETの実用化が可能になるかもしれないと考えていたのである。

## **組織変更**

もう一つ、入江にとって重要なきっかけとなったのが、組織改編だった。

それまでNECの半導体事業部にはトランジスタ部、ダイオード部があった。トランジスタ部は高周波部門（通信用）と低周波部門（一般用）に分かれていた。入江は、高周波部門に属していた。

この組織体制が1973年の夏前に改編された。NECはLSI、特にデジタルLSIへの注力を決定し、そのために半導体の事業体制を見直したのである。半導体関係の事業部は、第一LSI、第二LSI、半導体の3事業部となった。かつて半導体事業部のトランジスタ部にあった高周波部門が、売上が低下していたダイオード部を吸収する形で、第二LSI事業部の超高周波部へと統合された（図2参照）。同部では、光通信システムと高周波デバイスを扱った。

入江は旧トランジスタ部の高周波部門を率いて超高周波部に異動し、超高周波トランジスタ課長として就任した。その超高周波部のダイオード課に旧ダイオード部から移ってきたのが、若手ながら入社以来ダイオード開発で実績をあげていた神津英明だった。

神津がNECに入社したのは1970年で、最初に配属されたのは半導体事業部のダイオード部であった。部が違った入江と神津は直接一緒に仕事をしたことはなかったが、ダイオード部は入江のいたトランジスタ部に隣接しており、また神津の上司の渡辺（当時課長）が入江の同僚であり東工大時代の先輩だったこともあって、神津の話を聞いていた。

神津は、入社2、3年のうちに、デバイス開発で大きな業績をあげていた。初年に検波ダイオード開発を完了させると、2年目には複数のプロジェクトを走らせた。そのひとつにGaAsを用いて海外輸出向け衛星通信用パラメトリック増幅器のダイオードの開発があった。この成功によってNECは同製品の60%の世界シェアを獲得した。このほか、NTT向けに

---

<sup>18</sup> 接合型バイポーラ・トランジスタはpnpまたはnpn接合構造をもつ。p(positive)はキャリアが正孔、n(negative)はキャリアが電子である領域をいう。3つの領域に付いている3電極はエミッター（放出するもの）、ベース（基礎）、コレクター（集めるもの）と呼ばれる。

GaAs を用いた準ミリ波回線用デバイスの開発や NEC の本流である伝送事業部向けに初のアメリカ輸出用の装置向けピンダイオードの開発などを担当し、いずれも成功した。特にパラメトリック増幅器用ダイオードの開発は、入江のいるトランジスタ部が担当すべき4GHz 帯半導体の開発だったが、うまくいかず、ダイオード部に回ってきたもので、中央研究所所長の植之原もできないといていた技術であったが、神津はやってのけたのである。

これらのプロジェクトを成功裏に終えた神津は、次の仕事として、ダイオードでミリ波デバイスの開発を行うよう命じられた。しかし、応用技術的には高度なものであり、見通しが暗いと直感的に思っていた。

入江から神津に GaAs MES FET の研究開発の話が最初に持ちかけられたのは、神津がこのような状況にあったときで、まだ組織が改編される前の1973年の春頃のことだった。入江は、前述の写真触刻技術の可能性に着目して、その担い手として、部は違っていたものの、優れた若手技術者として注目していた神津に白羽の矢を立てて声をかけたのだった。ダイオードでミリ波デバイスを開発することに乗り気でなかった神津は興味をおぼえ、関連する資料を集めて、目を通したりした。だが、誘いはあくまでも非公式なもので、正式な仕事ではなかった。それが公式なものへとかわっていくきっかけとなったのが、上述の1973年夏前の組織改変だった。

神津が超高周波部ダイオード課へ異動し、入江と同じ部に所属になったことで、入江が本格的に神津を誘ったのである。神津は誘いを受けて、自分の部署にしながら GaAs MES FET の開発を行うつもりだった。そうすれば、自分で持っている装置・実験室も使える。

しかし、上司の渡辺は首を縦には振らなかった。その理由は、トランジスタは守備範囲でなかったことや技術的実現可能性の低さだった。NEC の GaAs MES FET 開発は遅れていたし、中央研究所所長の植之原でさえ実現困難と判断しているなど、不確実性が高かったのである。また、入江と神津は同じ超高周波部になったとはいえ、それぞれ異なった課に所属しており、入江の申し出が神津の直属の上司である渡辺を飛び越えていささか強引になされたことも、問題を複雑にした。

それでも諦めなかった神津に手を焼いた渡辺は超高周波部長の内丸に相談した。内丸は電子管事業部出身であり、真空管分野でマイクロ波を扱ってはいたが、半導体についての知識はあまり持っていなかった。神津は、以前よりこれと決めたことに関しては頑固を通し、技術的に難しいといわれていたことに対して結果を出してきた。こうした実績が認められていたこともあり、神津と面談した内丸は、半日ばかりで希望を主張し続けた神津に対し、従来の業務をきちんと引き継いだ上ならば、と応じたのであった。化合物ダイオードの分野ではアプリケーションの範囲に限界があり、実現可能性は低かったものの、GaAs MES FET という化合物半導体によって限界を抱えていたシリコントランジスタの応用分野へ食い込んでいくことが必要であると、内丸自身も感じていたと思われる。

神津の所属は、異動したばかりのダイオード課から入江の率いるトランジスタ課へと変わり、GaAs MES FET 開発がこうして1973年の夏からスタートした。

## **開発体制、確立へ**

入江は神津をリーダーに中央研究所のメンバーも含めたチームを編成した。当時、この未知の技術に対して事業部内の理解は乏しく、チーム結成はほとんど入江の独断だった。社内の通信システム・装置部門や電電公社の研究所などから GaAs MES FET の実用化を求める声があったわけではなく、事業部としてその開発を積極的に進める気運は欠けていた。

中央研究所の方では、事業部側が GaAs MES FET の開発に乗り出す以前の 1970 年ごろより同技術の研究開発を進めていたものの、まだ初期段階で多くの技術的問題に直面していたし、そもそも実用化を明確に意識していたわけでもなかったが、入江の開発計画に対し協力することには支障はなかった。所長の植之原は、むしろ、事業部の意向をよく理解し、成果を早く事業部に移管をするべきだと考えていたほどだった。中央研究所の建物が同じ敷地内にある、隣接していたこともあって、共同作業はやりやすかった。

実験装置は、神津が入江の課に異動しても、そのまま使うことができた。それまで神津が装置の維持・管理を行ってきたからである。入社当時、神津は先輩の研究員が管理していた実験装置を思うように使えず、歯がゆさを感じた。このため、2 年目からは、ほかの者が嫌がるような装置の維持・管理を積極的に引き受けることで、実験装置をより自由に使用できるように努めてきた。おかげで、神津が GaAs MES FET の開発に乗り出したときには、実験装置は神津の所管であるとの意識が周りの研究者たちには定着していた。別の課に移った神津が使うことに違和感を抱くものはなかった。また、神津が所属していたかつてのダイオード部でも、組織改編後の超高周波部でも、研究開発はある程度量産化が進んでしまった後は改良が主になるため、製造部の設備を使うことが多く、同部の実験設備は比較的能力にゆとりがあったという事情もあった。

神津にとってさらに好都合だったのは、旧ダイオード部で量産を担当していた製造部門から GaAs MES FET の結晶開発への協力を得られたことだった。旧ダイオード部には、シリコン結晶と GaAs の結晶の技術者がいた。そのうち、GaAs 結晶は主にガンダイオード（発信デバイス）に使われていたが、第一次オイルショック（1973 年）の影響でガンダイオードの需要が少なくなり、技術者と設備に余裕があったのである。

ダイオードの仕事の引き継ぎもこなしながら、神津は GaAs MES FET の開発に注力していった。

## **4. 技術的ハードルの克服**

### **鍵となった写真触刻技術**

こうして体制を整えながら開発に取り組んだ結果、神津らは、1974 年のはじめころには、問題はまだ残っているものの、いけるかもしれないという感触をつかむまでにいった。それは前年夏に本格的に開発に着手してからまだわずか半年しか経っていない時期のことだった。

GaAs MES FET の実用化を成功させるには、前述のように、GaAs という化合物半導体がそもそも持っている技術的困難を解決しなければならなかった。GaAs を高品質の結晶に成長させるのが難しい、GaAs に適した表面保護膜がない（したがって水を通しやすく、薬品に弱い）といった問題であった。これらの問題を克服して GaAs 結晶を安定して形成し、さらに、再現よく特性を引き出せるデバイスをいかに生産するかが課題であった。

NEC が GaAs MES FET の量産化に成功したのは、先に述べた通り、①GaAs 結晶成長技術、②オーム性電極とショットキーバリア電極、③写真蝕刻技術、④内部整合化、⑤品質保証技術とそのシステム開発、実用化、⑥技術設計理論の確立、⑦パッケージング技術、という 7 つの技術の革新を実現したからであるが（前掲表 2）、中でも重要な鍵となったのが、③の写真蝕刻技術であった。

写真蝕刻技術は、GaAs MES FET の FET 構造（前掲図 1）においてもっとも細いゲート長を形成するために用いられた技術である。ゲート長とは、大まかに言えば、ソース電極からゲート電極を流れる電子の移動距離である。ゲート長が短ければ短いほど電子は少ない時間で移動できるので、理論的に回路が高速化できることになる。しかしながら、当時は、ゲート長を短くして GaAs MES FET の雑音指数、電力利得を支配するゲート電極を均一かつ再現よく実現することは困難であり、量産化が妨げられていた。NEC は、写真蝕刻法でサイドエッチングしてゲート長を短くすることでこの問題を乗り越えたのである。

それは、ゲート電極の上にソース・ドレイン間が 3 ミクロンになるようにフォトレジストを乗せて露光させアルミを両側から 1 ミクロンほど内側にエッチングし、ゲート幅を 1 ミクロンにするという技術であった。これにより、ゲート長を当時に量産化された半導体デバイスの中ではもっとも小さい 0.5～1 ミクロンに安定的に形成することができた（写真蝕刻技術による工程は図 3 参照）。当時は無理だった 1 ミクロンの位置あわせ（ゲートとソース及びドレインとの距離）ができたことが、デバイス性能の安定化に繋がり、実用化と量産化を可能にしたのであった。

この技術は、もともと中央研究所で蓄積されていたものだった。写真蝕刻法自体は当時最も一般的な紫外線露光技術であったが、中央研究所の固体部では、ある特殊な事情から、これを FET 特性評価に用いていた。

中央研究所では、固体部とデバイス部が GaAs MES FET の研究に取り組んでいた<sup>19</sup>。結晶の開発を担当する固体部が GaAs 基板からエピタキシャル成長による GaAs 活性層までを、デバイス部が FET 試作から評価までを担当し、固体部はデバイス部から特性の測定結果をもらうことになっていた。しかし、両者間のやり取りには時間がかかり、開発サイクルが長くなってしまっていた。他の企業では通常デバイスの開発部隊と結晶の開発部隊は同じ部署に属しているのに対して、NEC の中央研究所では別の組織に別れており、これが開発に時間がかかる理由の一つとなっていた。そもそも研究に着手したのが遅く、しかも作業のペ

---

<sup>19</sup> 半導体事業部のほうの開発部門では、シリコンによるトランジスタ、ダイオード、IC などの開発を担当していた。

ースが遅かったことから、固体部はデバイス部の評価を待たずに自ら評価を行うことで作業のスピードを上げようとしたのだった。そのために用いられたのが写真触刻技術だった。写真触刻技術を評価に使うという発想は、デバイス部から固体部へ異動してきた人材を通して取り入れられたものだった。

開発サイクルを短縮するためのいわば苦肉の策ともいべきこの試みが予想外によい成果を出すことになったわけだが、それは偶然が作用した結果でもあった。そもそも、写真触刻技術で用いるサイドエッチングは不安定で制御するのが難しく、当時のデバイス技術者の常識ではデバイスの製造に使うという発想はありえなかった。デバイスの製造を担当しない固体部があくまでも結晶の評価用に臨時に使うという特殊な事情が、非常識な方法を試みさせたのである。さらに、もうひとつの偶然として重要だったのが、たまたま固体部が使った旧型のデバイス製造装置で形成されるアルミの膜質が、結果的にサイドエッチングの技術に適した特性（アルミの粒子が細かい）を備えていたことだった。これは、デバイス部が持っているような最新の製造装置を使っていたら実現していなかった特性であった。つまり、デバイスの専門家であれば試みるはずのないことを、デバイス部門であれば使わない装置を使って実行したことが、結果的に予想していなかった成果をもたらしたのである。

ただし、結果的に固体部で興味深い成果がえられたものの、中央研究所側には写真触刻技術でゲート長のエッチングをし、量産にもっていくという発想はなかった。この技術を量産化に応用することを思いついたのは、先述の通り、中央研究所所長の植之原や中央研究所出身である上司の佐々木（半導体事業部長）を通して話しを聞いた入江だった。写真触刻技術を量産化に応用するという発想は入江の独創であり、神津を巻き込んでそのための開発体制をなかば強引に作り上げたのも入江であった。

といっても、偶然によって見いだされた技術が本当に実用に適しているのかを見極めるのは簡単なことではなかった。開発に本格的に取り組んだ神津たちが、なんとかいけるかもしれないと思えるようになったのが半年後のことであり、最初の実用サンプルを用意できたのは約一年後のことであった。固体部が当初使ったのとは違う装置を使って成果が出ず、粒子の細かいアルミの膜質を形成することが重要であることがわかったのも、この過程でのことだった。

## **その他の技術革新**

こうして写真触刻技術の革新が従来の技術的障壁を突破する鍵となったが、しかしこれだけでは実用にたえる品質とコストの目標には届かなかった。安定した品質を安いコストで実現するために開発されたのが、残りの6つの技術だった。

NECが見出したオーム性電極とショットキーバリア電極の形成方法(②)はGaAs MESFETの特性を安定して引き出しFETの寿命を長期化する(信頼度を高める)ことを可能にした。上述のようにFET構造では、ソースとドレインという2つの電極間を流れる電子に

ゲート電極の電界の力を利用して信号を伝え増幅させる。この2つの電極は電子の流れ（電流）を通すため、可能な限り抵抗が低いオーム性電極である必要がある。NECは、活性層に被着させる金ゲルマニウム合金の構成比を最適化し、かつ、この合金と活性層を反応させる熱処理工程を工夫して両電極をオーム性電極にすることに成功した。さらに、オーム性電極は、外部端子との接続のための接続電極と接するが、その接続電極をチタン（Ti）/白金（Pt）/金（Au）という構造にしたことで、長期間（ $10^9$ 時間以上）の使用にも耐えうる信頼度の高い電極を実現した。

もう一つの電極であるゲート電極はGaAs活性層とショットキーバリア接合を形成するが、NECではこのゲート電極にアルミニウム（Al）を用いることで500°C程度の高温処理においても特性が劣化しないことを見出した。高温の熱処理はFETの製造工程において電極を保護するシリコン酸化膜（SiO<sub>2</sub>）の形成工程で必要となる。さらに、ソースとドレイン電極に用いたチタン（Ti）/白金（Pt）/金（Au）の構造は、ゲート電極でも用いられ、ゲート電極のアルミと、外部端子と接続するために使われている金属線の金線が化学反応を起こして高抵抗の金属化合物を作り、特性劣化を招くことを防いだ。NECでは、チタン（Ti）/白金（Pt）/金（Au）という電極構造を発見するまでに1年ぐらい試行錯誤を繰り返した。電極にこの構造を用いることで、NECのFETは長期寿命を達成し、マイクロ波通信や衛星通信への道を切り拓いていった。

④内部整合化技術、⑦パッケージング技術は、安定してFETを量産するために工夫した点である。内部整合化技術は、システムとしてトランジスタの有している電力利得を高めるための技術であり、基本FETをパッケージ内に多数個、並列動作させ、あたかもひとつの素子として働かせる（図4参照）。内部整合回路に不可欠な比誘電率が高く低損失の誘電体材料の開発を行うことにより、高出力GaAs MES FETの開発・量産化が可能となった。パッケージング技術はパッケージにおいて入出力間のアイソレーションにエアギャップを用いたことにより、入出力帰還容量<sup>20</sup>が小さいGaAs MES FETにおいて、寄生容量を0.007pF以下に抑えることを可能にした（図5参照）。このパッケージは品質保証システムにおける高周波項目の抜き取り測定にも用いられた。

⑤品質保証システムや⑥設計理論は、量産を行いながらまとめたものである。

量産が開始されても、安定した品質を保つことがなかなかできなかった。どこで何をしたら特性が変化するのかといったことは量産開始後も課題として残り、試行錯誤が繰り返された。誰もこのようなことがわかってないときに製造するためには、とにかく、数多くの実験を繰り返すしかなかったのである。

たとえば、NECが内部で作った基板については、様々な大学の協力のもとでやっとある程度の品質を確保できたため、これを受けて、NECでは基板を内製から外部調達に切り替えようとしたが、技術指導もむなしくサプライヤーの製造した基板の品質には、ばらつき

---

<sup>20</sup> 入出力帰還容量とは、入力端子と出力端子に間に存在する寄生容量で、これが大きいとマイクロ波では出力から入力に戻ってしまう電力が増すために、電力増幅率が低下し、マイクロ波特性が悪くなる。

が出てしまった。

NEC ではこのような生産プロセスにおける試行錯誤の結果を品質保証システムや設計理論として纏め上げたのである。品質保証システムは多くの故障モードを解析し、そのメカニズムをまとめたものである（図6参照）。これにより、ばらつきが大きいと言われていたGaAsのMES FETの特性と信頼性を保証するとともに、トレーサビリティが確保できた。設計理論はGaAs MES FETの設計段階での特性保証のための理論をまとめたものであり、これにより測定工数が低減された。この両者は問題と問題解決の明文化であり、サプライヤーを初め多くの企業の見本となった。

これら一連の技術はいずれも、実用サンプルを用意し、さらに量産体制を整えていく過程を通じて1975年末頃までに確立されていったものだった。

NECのGaAs MES FETの革新において最終的に写真触刻技術とともにもう一つの鍵となった結晶成長技術（①）が確立されるまでにはさらに時間を費やし、それは1976年のこととなった。結晶成長技術とは、不安定なGaAsの結晶を安定的に連続成長させる技術をいう。GaAsは、ガリウムと砒素が不安定な構造をとるため、結晶の質（特性）が一定しない（再現性が小さい）のが欠点であるが、中央研究所の固体部が研究していた結晶も、GaAs基板の構造自体の温度特性は良かったが、デバイスにしたとたん性能が出なかった。

開発チームでは、これを克服して結晶の特性を安定して成長させ、かつデバイスに組み込んでも性能を出せる方法を考えなければならなかった。半絶縁性GaAs基板はGaAs材料にクロム等の不純物を添加することにより実現されるが、この上に、n型GaAs活性層を成長させると活性層が半絶縁性GaAs基板の影響を受け、活性層の特性の再現性が低くなる。この影響を排除するために、開発チームは、高い比抵抗をもつバッファ層を成長させる技術を開発した。こうした構造を持つ結晶を作ることによって、固体部が研究していた結晶でも特性が安定させることができた。

しかし、その結晶は小さかったため、NECでは、自動化された精密なガスコントロールを有する多数枚結晶成長装置を開発し、結晶の高品質性とコストダウンを同時に実現した。これらの結晶成長技術により、NECの開発したGaAsの結晶は、MES FETで信号を動作させるために必要な不純物濃度（電子の濃度）の界面での急峻性を実現でき、かつ、基板からの影響で電子移動度が極端に下がる現象を回避し、電子移動度の値を一定化することが可能になった。また、当時はなかなかできなかった基板面内の均一化も達成することができたのである。

この技術も、NECが当初社内で製造していた基板を外注に切り替えたことで確立したものであった。社内では理屈抜きでなんとか良品を確保したのに対し、外注では社外の企業に品質指導をすることが必要になり、その結果上記の方法が見いだされていったのである。

## 5. 市場獲得と量産に向けて

神津を中心にしてGaAs MES FET開発が正式にスタートしてから約一年でサンプルがで

きあがると、入江は、国内ではなく海外にむけて既存のトランジスタの販売網を通してサンプルを配布しながら売り込みを開始した。国内ではインフラを提供する電電公社、国鉄、電力会社が主な供給先であり、民生用としての活用は未知数で通信装置用のトランジスタ市場は小さいと思われたからである。すでに海外では、NEC のマイクロ波低雑音用シリコン・バイポーラ・トランジスタはトップレベルにあった。それらの販売チャンネルは主にマイクロ波市場に精通した海外の販売代理店であり、顧客企業別の NEC 本社の販売体制とは異なっていた。各国で導入が開始されたばかりの衛星通信機器において NEC のパラメトリック増幅器のシェアが 6、7 割を占めていたおかげで、欧米顧客の間で NEC の名前が売れていたのは好都合だった。また、論文を学会に提出したり、学会に併設された展示会などにも積極的に商品を陳列したりして、自社製品をアピールした。

最初の供給先はカナディアン・マルコーニだった。通信会社で、量は少なかったが、NEC が開発した GaAs MES FET を高く評価し、最初の顧客となってくれた。その後、納入先は、ヒューズエアクラフト、ATT、GE、HP など通信機やマイクロ波装置を製造している米加メーカーへと広がっていった。1974年に NEC が GaAs MES FET の市販を開始したときには、低雑音増幅器用としてはシリコン・バイポーラ・トランジスタが主流だったが、やがて GaAs MES FET が市場を奪っていった。写真触刻技術を足がかりに NEC が確立した独自の技術を模倣できる企業はしばらく現れず、ほぼ 2 年間、NEC が独占的に販売した。

GaAs MES FET は次第に市場を拡大して行ったものの、その事業体制は決して恵まれたものではなかった。GaAs MES FET は新しい技術であり、当初開拓した市場も大きくはなかった。入江は将来まで考えて予算を配分すべきだと主張したが、売れ行きがどうなるかは未知数だったため、十分な予算を確保できなかった。

その割に、必要な設備は高価で、例えば、高周波測定器はヒューレットパッカートの開発したもので 1 台 3 億～4 億円もした（従来の平均的装置の値段は 400 万から 500 万円ぐらい）ため、事業部では承認されなかった。そのため、島津製作所や横河電機、アンリツなどから測定器・計測器を借りたり、従来製品を改善して新たに作ってもらったりした。量産を開始するにあたっては、超高周波部が持っていた GaAs 結晶成長装置やそのほかの GaAs MES FET に関連する実験用の装置を、製造に転用して製造部の一部を間借りして生産することにした。開発に成功したからといって、市場で量が確保できるわけではない。製造部では従来の製品への対応もしなくてはならず、GaAs MES FET の量産に必要な投資を行うわけにはいかなかった。

こうして初期投資を節約しながら事業を立ち上げていった。幸運だったのは、ガンダイオードの販売が減少していたのと、玉川事業場からシリコンデバイスが地方製造子会社へ移転したために、製造フロアや製造技能者に余剰が発生していたことだった。こうした余剰をうまく活かしつつ、中古製造装置の転用等も図り、生産規模の拡大を図っていった。

結晶成長に必要な結晶基板は、住友電工、日本軽金属、日立電線などから購入して量産に備えた。NEC ではダイオードの結晶に関しては外部より基板を購入していた。神津は、

これらの企業とすでに関係を構築していたかつての仲間を通して、GaAs MES FETに関しても結晶基板を購入することにしたのだった。ダイオードではn型基板を用いていたが、NECでは、サプライヤーに対しそれにクロムを入れれば半絶縁性になると説明し、必要があれば技術支援を行った。中央研究所の研究をベースに構築されたGaAs 基板や内部整合技術は、外部調達をする際のスタンダードとして用いられた。基板の外部調達に伴い、NECでは内製をやめた<sup>21</sup>。

また、パッケージング技術については、電気回路とトランジスタをあわせるとどのように動作し、パッケージとしてどういうものが必要かが重要になった。すでに半導体事業部ではセラミックのパッケージング技術を有しており、パッケージメーカーを指導できる技術者が存在していた。彼らとともにパッケージ技術を開発してくれたのが京セラであった。

## 6. GaAs MES FET 量産化の成果とその背景

GaAs MES FET そのものの生産量や売上高は決して大きくなかったが、海外で衛星放送アンテナの普及が進む中で売上を拡大し、3、4年で年商 60 億円ほどの規模に達した。マイクロ波通信装置（民生用）では、パラメトリック増幅器のダイオード増幅器やエサキダイオード増幅器、ガンダイオードやインパットダイオードを用いた装置などから GaAs MES FET 装置への代替が起こった。また、中継器などでは送信装置が真空管から半導体に置き換えられた（固体化という）結果、寿命が永久的になりメンテナンスが不要になるとともに、小型軽量化が実現できた。GaAs MES FET は準ミリ波システムにおいて直接増幅装置としても採用されるようになった。これらの結果、マイクロ波通信装置におけるシステムの固体化が可能となり、小型化すると同時にコストが著しく低減した。

GaAs MES FET の応用範囲はさらに広がっていった。たとえば、レーダーなどの周波数の高い分野で GaAs MES FET を用いた多様なアプリケーションが登場し、NEC も当初の低雑音用から高出力用へと応用分野の拡大をはかり、GaAs MES FET の用途市場は、30 数 GHz ミリ波帯においても使用可能な超低雑音増幅器から準ミリ波帯における電力増幅、発信器用まで、十数種類に拡張された。これらの結果、1980 年時点で、世界のマイクロ波送受信装置向け GaAs MES FET における NEC の市場占有率は 80%に達した。

この事例について特筆すべき点は、世界中で多くの企業が GaAs MES FET の製品化を目指していた中で、当時半導体企業としては決して最先端、大手企業とはいえなかった NEC が他社に先駆けて実用化に成功したということである。神津自身が海外の関係者からも秘訣を知りたいと質問を受けた。なぜ、NEC にこれができるのだろうか。

第一に、研究から製品開発、事業化にいたる過程での様々な組織の協力があつた（表 3 参照）。中央研究所の固体部、半導体事業部の旧ダイオード部、事業部製造部門など、多様な部門がそれぞれの得意な技術を持ちよつたのがその成功の背後にあつた。

中央研究所で GaAs MES FET の開発に携わっていた固体部が、開発が思ったようなテン

---

<sup>21</sup> その後、購入品にトラブルが発生し、調達先を買収するという案も一時検討された。

ポが進まないことからみずから簡単なデバイスを作成して結晶を評価するために写真触刻技術を用いて成果が出たことが、ことの始まりだった。これを実用化に使ってみようと入江が思いつき、それまでダイオードの開発をやっていた神津を引っ張り込み、固体部の研究者も開発メンバーに加え、これまで困難とされていた結晶の安定成長を目指して、開発体制を整えていったのである。また、旧ダイオード部で量産を担当していた技術者の中にはシリコン結晶と GaAs の結晶の技術者がおり、彼らから GaAs MES FET の結晶開発への協力を得られたこともプラスに働いた。

このような様々な部門の協力が可能になったのは、様々な部門の人間がそれまでの仕事の経験や上司を経由してのつながりなどを通じてインフォーマルにつながっていたからであり、専門化した組織の壁を乗り越えることを可能にした。正式な関係だけではここまでの成果に結びつかなかったかもしれない。人事異動や組織再編がそうしたインフォーマルなネットワークが従来の組織の枠組みを超えて広がっていく重要な契機となること（それは決して事前に計算されたものではないが）をこのケースは物語っている。異なる専門を持つ人々が（しばしば本人の意向とは関係なく）大きな組織の中で異動し、それまで触れ合わなかった人々が触れ合うようになり、また既存の人間関係が新たな広がりを持ったりすることが技術革新の一つの温床となるのだろう。そして、そうしたネットワークと機会をいかして、なかば強引ともいえる態勢作りをなんとか実現して、プロデューサーとして組織協力の土台を作った入江の役割が大きかったといえるだろう。

第二に、量産のための資源の手当が幸運も働いてうまくいった。タイミングよく、ガンダイオードの生産減によって余剰能力が発生したことで、まだ将来もわからなかった GaAs MES FET の製造に設備をまわすことが可能になった。

第三に、海外に積極的に売り込んでいったこと、そのためのルートがあったこと（入江の経験）が挙げられよう。直接顧客に接し、様々な顧客を横断的にみることも可能だった。電電公社は当初は GaAs MES FET には関心が薄かったが、それに縛られなかった。社内のシステム部門の関心もごく一部（アングラ的プロジェクト）に限られていた。通常の販売部門や顧客があまり関与せず、その分社内の支援や理解は限られたものの、製品開発、事業開拓の担当者が直接海外の多様な顧客とやりとりしたことも、この事業がうまく立ち上がった要因のひとつとして考えられる。

## 7. その後の化合物半導体事業

1980 年代になると、マイクロ波通信装置、衛星通信装置の半導体化を背景に各メーカー間で GaAs MES FET の高出力、動作周波数をめぐり競争が激化した。新技術も登場した。富士通が 1980 年に発表した HEMT<sup>22</sup> である。これは、GaAs MES FET とはまったく異なる結晶

<sup>22</sup> 高電子移動度トランジスタ。化合物半導体材料を利用した電界効果型トランジスタの 1 つ。バンド・ギャップの違う異種の半導体材料を接合することで界面に 2 次元電子ガスの層を作り出す。この層では通常の電子が半導体内に比べて、高速で電子が移動できる。2 次元電子ガスには散乱要因が少ないためである。さらに AlGaAs のようなバンド・ギャップの大きな物質だけに選択的に N 型不純物をドーブしたものと、

成長技術<sup>23</sup>を用いるもので、GaAs MES FETの改良で世界シェアを維持してきたNECの牙城を揺るがすものだった。NECのGaAs MES FETの売上は、1980年代以降頭打ちとなった。

NECは1986年に化合物デバイス事業部を組織し、通信の応用市場に特化した事業を展開したが、幅広い製品を担当することになった上、開発負担・装置購入など製造費負担が嵩み、伸び悩んだ。従来の化合物デバイスの研究開発も、新技術 HEMT への対応も1981年に政府主導でスタートした「スーパーコンピュータ」プロジェクト下での GaAs LSI 開発への注力により、手薄にならざるを得なかった。

80年代後半より立ち上がっていった携帯電話市場においても、携帯用端末用の送信用基本素子が、アナログ時代のGaAs MES FETやHEMTからデジタル時代（第三世代）のHBT<sup>24</sup>へ移る中で、NECは出遅れてしまう。NECのアンテナスイッチに対する需要が大きかったため、HBT技術の重要性に対する認識が薄かったのである。NECは、GaAs MES FETの革新によっていったん化合物半導体分野で世界の先頭に躍り出たものの、その地位を長く維持することはかなわなかった。それは一体なぜだったのか。本ケースの扱う問いかけではないが、別の機会に改めて考えなくてはいけない問題である。

(文中敬称略)

---

不純物をドーピングしていない GaAs などを接合して、2次元電子ガスの層に流れる電子を増やしている。結果として、高速なスイッチングと感度を高めることが可能になる（日経エレクトロニクス用語）。

<sup>23</sup> MBE のこと。MBE とは Molecular Beam Epitaxy の略で、分子線エピタキシー法と呼ばれる。真空蒸着法に分類され、物理吸着を利用する。高真空のために、原料供給機構より放たれた分子が他の気体分子にぶつかることなく直進し、ビーム状の分子線となるのが名称の由来（Wikipedia）。

<sup>24</sup> ヘテロ接合バイポーラ・トランジスタ。ヘテロ接合（異種の半導体接合）を利用したバイポーラ・トランジスタの素子構造の1つ。携帯電話機や無線 LAN のパワー・アンプなどに用いる。パワー・アンプに用いた場合、線形特性に優れるという特徴を持つ。SiGe や GaAs, AlGaAs, InGaP, GaN 系などを材料とする（日経エレクトロニクス用語）。

## 参考資料

第 25 回大河内記念賞『砒化ガリウム電界効果型トランジスタの開発・量産化』  
財団法人日本経営史研究所編『NEC の 100 年 情報通信の歩みとともに』2000 年、日本電気株式会社  
日本電気社史編纂室 編『日本電気株式会社百年史』2001 年、日本電気株式会社  
日本電気株式会社、マイクロ波ブロック『マイクロ波衛星通信事業 50 年の歴史』1995 年  
福田益美、平地康剛『化合物半導体デバイスの魅力』2003 年、工業調査会  
NEC エレクトロニクス社 Annual Report 2007  
三菱電機株式会社技術研修所編『わかりやすい半導体デバイス』1996 年、オーム社出版局

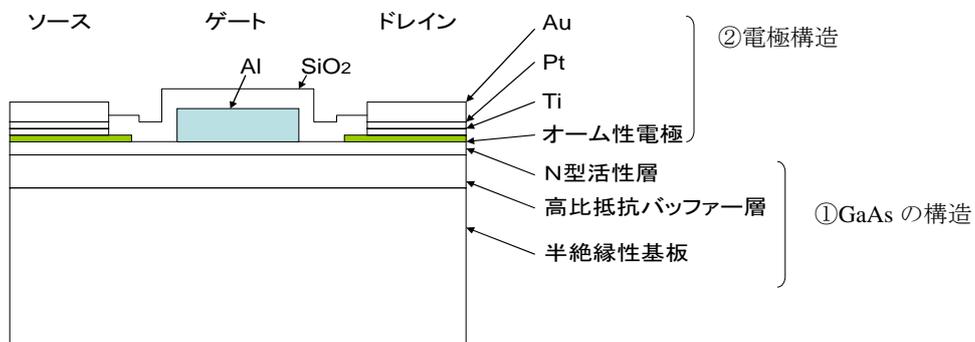
主要インターネットソース

日経エレクトロニクスTech-On 用語：<http://techon.nikkeibp.co.jp/word/>

Wikipedia: <http://ja.wikipedia.org/wiki/>

IT Pro Dictionary: <http://itpro.nikkeibp.co.jp/dictionary/index.html>

図 1 GaAs MES FET の断面図



2006/2/13 一橋大学大河内賞研究プロジェクト発表資料

表1 電磁波\*の分類と用途

| 波数範囲              | 波長             | 電波法の記号 | 慣用の名称 |       | 特徴  | 主な用途（日本国内）   |
|-------------------|----------------|--------|-------|-------|---|--|
|                   |                |        | 英語    | 日本語   |   |  |
| 30kHz ~<br>0.3MHz | 10km ~<br>1km  | LF     | LF    | 長波    | 地表波による安定した通信が可能。大電力の送信機の製作が容易                                 | LORAN-C・標準電波（電波時計）・船舶無線電信・RFID・長波ラジオ放送                                 |
| 0.3MHz ~<br>3MHz  | 1km ~<br>0.1km | MF     | MF    | 中波    | 昼間は地表波による安定した通信・夜間は電離層による反射で遠距離通信が可能。                         | 中波ラジオ放送・船舶気象通報・無線航法(NDB/ADF)・アマチュア無線（トップバンド）                           |
| 3MHz ~<br>30MHz   | 0.1km ~<br>10m | HF     | HF    | 短波    | 電離層による反射で遠距離通信が可能。季節や時間帯による伝送特性の変化が大きい。                       | 船舶無線・(洋上)航空無線・短波ラジオ放送・RFID・アマチュア無線・トランシーバー玩具・ラジコン                      |
| 30MHz ~<br>0.3GHz | 10m ~<br>1m    | VHF    | VHF   | 超短波   | 空間波による見通し範囲の通信が可能。スボラディックE層やラジオダクトによる異常伝搬で遠くの送信局の妨害を受けることもある。 | ワイヤレスマイク・ラジコン・産業用ラジコン・MRI・業務用移動通信・FMラジオ放送・テレビ放送(1ch~12ch)・アマチュア無線      |
| 0.3GHz ~<br>3GHz  | 1m ~<br>0.1m   | UHF    | UHF   | 極超短波  | アンテナが小さくなるため移動体通信に適する。  | 列車無線・アナログコードレス電話親機・特定小電力無線・空港無線電話・テレビ放送(13ch~62ch)携帯電話・PHS・業務用移動通信・GPS |
| 3GHz ~<br>30GHz   | 0.1m ~<br>10mm | SHF    | SHF   | マイクロ波 | 高速データ通信用として技術開発が行われている。                                       | 衛星通信・衛星テレビ放送・放送用中継回線・無線アクセス・無線LAN・ISMバンド(ETC)・アマチュア無線                  |
| 30GHz ~<br>0.3THz | 10mm ~<br>1mm  | EHF    | EHF   | ミリ波   | 直進性が非常に強い。  | レーダー・衛星通信・50GHz帯簡易無線・プラズマ診断・アマチュア無線・ESR                                |
| 0.3THz ~<br>3THz  | 1mm ~<br>0.1mm |        |       | サブミリ波 | 光と電波の中間領域。  | 電波天文（宇宙電波の受信）・非破壊検査  |

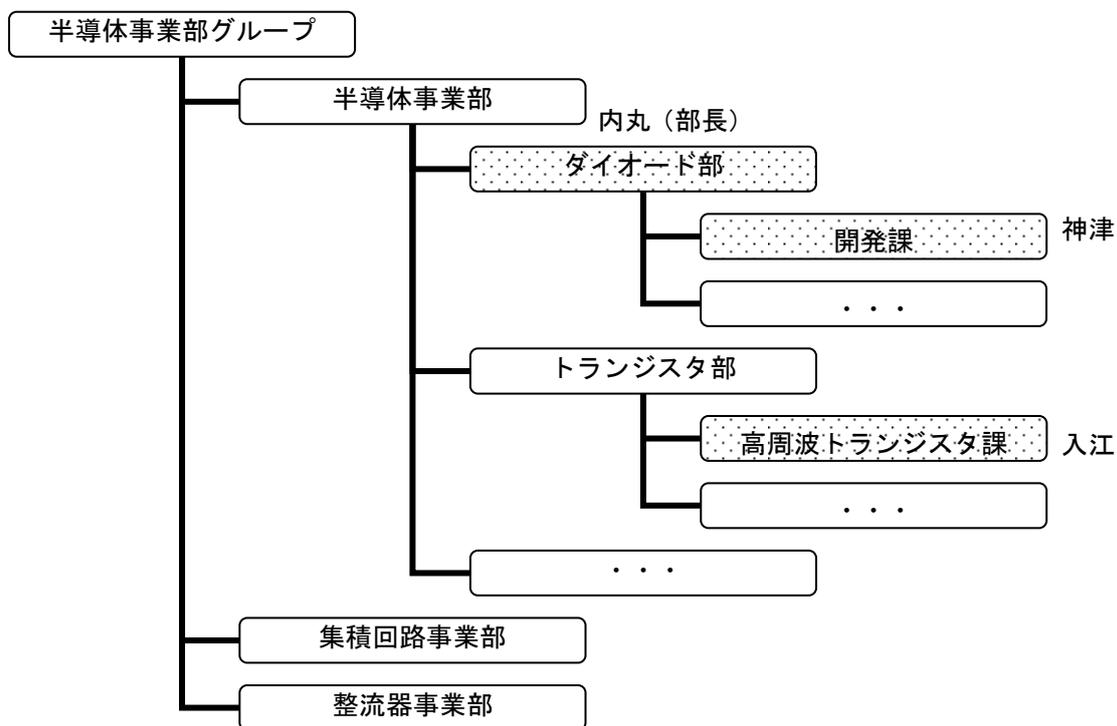
注：電磁波とは：「光」とは狭義には所謂「可視光」のことで、波長380nm~700nmの間。380nmより短い波は「紫外線」、700nmより長い波は「赤外線」、それよりもっと長い波は遠赤外線と呼ばれる。人間は遠赤外線に当たると皮膚に温かみを感じるが、これが「熱」である。もっと長い波長の波は「電波」と呼ばれ、携帯電話やTV、ラジオに使われている。つまり、光も熱も電波も周波数（波長）が異なるだけで、本質は皆同じものであり、これらを総称して「電磁波」と呼ばれる。

資料：『化合物半導体デバイスの魅力』より作成

**表 2 GaAs MES FET 開発・量産化のための 7 つの技術革新**

|                     |  |
|---------------------|--|
| ①結晶成長技術             | 不安定な GaAs の結晶を安定して連続成長させる技術。量産化に貢献。中央研究所固体部が研究していた基板構造をもとに成長させる。   |
| ②オーム性電極とショットキーバリア電極 | 結晶成長技術と並び、GaAs MES FET の特性、信頼度に大きな影響を与える電極の形成方法。アルミニウムをショットキー接合に用い、チタン=白金=金という積層の電極をアルミニウムの上に形成することで、500 度C の高温においても特性が変化しない耐熱性の高いゲート電極を実現。  |
| ③写真触刻技術             | もっとも細いゲートを形成するための技術。電子ビーム露光等などの先端技術を使用することなく、もっとも一般的な紫外線露光技術を用いて、GaAs MES FET の雑音指数、電力利得を支配するゲート電極を均一かつ再現よく実現。中央研究所の固体部で評価に用いられていたものを量産に用いた。   |
| ④内部整合化技術            | トランジスタの有している電力利得を高めるための技術。基本 FET をパッケージ内に多数個、並列動作させ、あたかもひとつの素子として働かせる。これにより、GaAs MES FET の開発に不可欠な比誘電率が高い低損失の誘電体材料の開発・量産化が可能となった。同技術が用いられたのは高出力用 FET において。                                      |
| ⑤品質保証システム           | 多くの故障モードを解析し、そのメカニズムを品質保証システムとして構築。これにより、ばらつきが大きいと言われていた GaAs の MES FET の特性と信頼性を保証するとともに、トレーサビリティが確保できた。   |
| ⑥設計理論の確立            | GaAs MES FET の設計段階での特性保証のための理論。測定が難しかった高周波特性を、FET 素子の物理的パラメーターおよび直流特性を測定することで、理論的に示す。これにより測定工数が低減された。当初は 4Ghz の周波数帯で測定していたが、後に海外顧客向けにより高い周波数帯でも対応可能となった。                                       |
| ⑦パッケージング技術          | GaAs MES FET は入出力帰還容量が小さいため、それに供するパッケージにおいて、入出力間のアイソレーションにエアギャップを用いた。これにより、寄生容量が 0.007pF 以下に抑えられた。このパッケージは品質保証システムにおける高周波項目の抜き取り測定にも用いられた。パッケージの素材は当初ベリリアであったが、健康を害する可能性があったため、アルミナ（セラミック）に変更。 |

図 2 1973 年の半導体事業グループの組織改編



新組織 (1973 年夏ごろ)

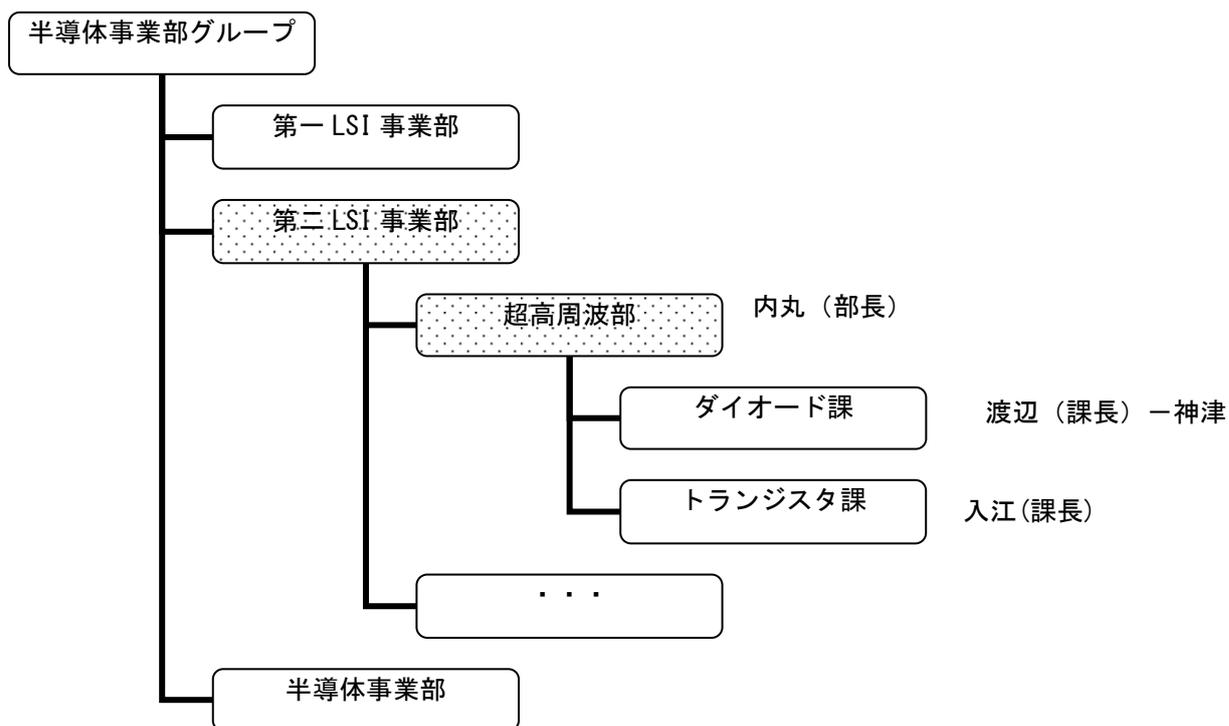
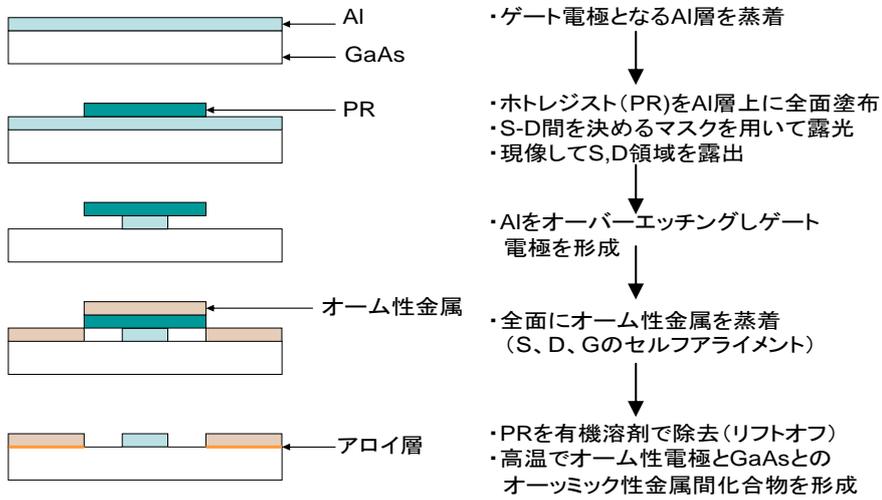
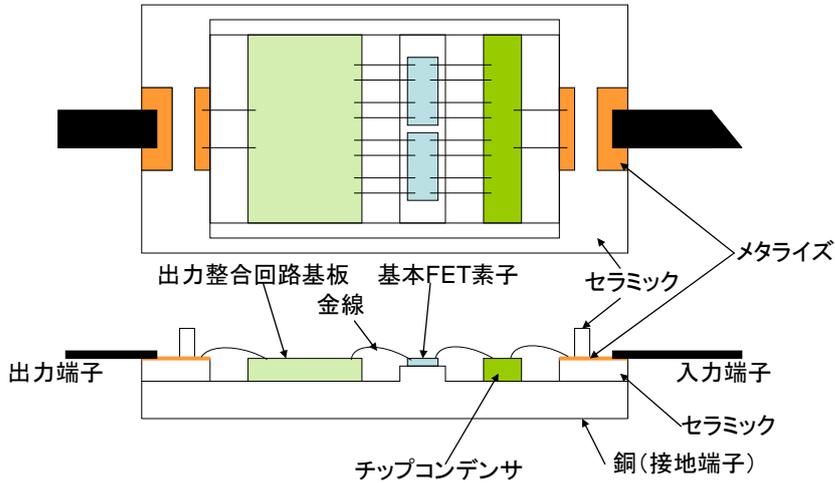


図 3 写真触刻法の工程



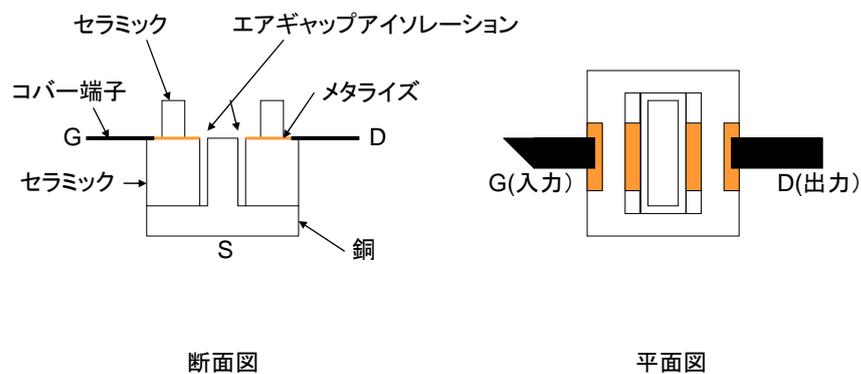
2006/2/13 一橋大学大河内賞研究プロジェクト発表資料

図 4 内部整合化技術の概念図



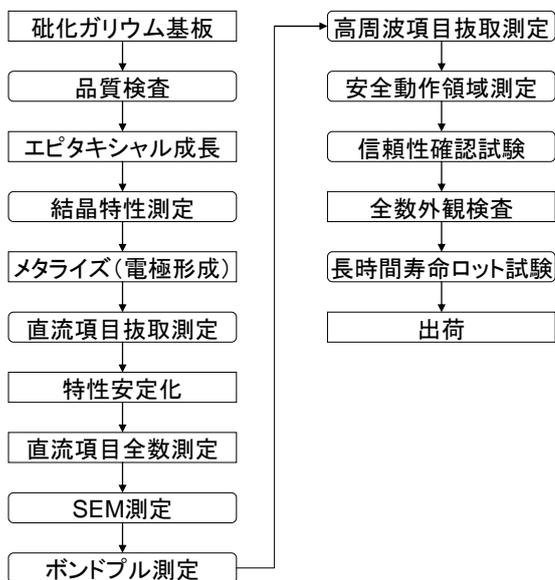
2006/2/13 一橋大学大河内賞研究プロジェクト発表資料

図 5 パッケージの基本構造



2006/2/13 一橋大学大河内賞研究プロジェクト発表資料

図 6 GaAs MES FET の品質保証システム



2006/2/13 一橋大学大河内賞研究プロジェクト発表資料

表3 開発から量産までに GaAs MES FET にかかわった部署

|      |                                      | 中央研究所  | 事業部  |
|------|--------------------------------------|--|--|
| 開発   | 結晶基板<br>結晶成長<br>F E T 製造<br><br>装置開発 | 固体部<br>固体部<br>固体部（写真食刻技術等の初期技術の殆ど。低雑音 F E T）<br>デバイス部（高出力 F E T） | （ダイオードでは外部調達）<br>旧ダイオード部技術者仲間<br>旧ダイオード部<br><br>第二 L S I 事業部の関連部門の協力 |
| 量産体制 | 製造装置<br><br>結晶基板<br><br>パッケージ        |  | 旧ダイオード部の実験装置を転用<br><br>内製→外部調達（住友電工、日本軽金属、日立電線など）<br>半導体事業部の技術者と京セラ  |
| 販売   |                                      |  | 海外代理店  |

表4 年表

| 年  | NEC での出来事   | 社会での出来事                    |
|----|---|----------------------------|
| 67 | 初めて海外から衛星通信地球局を受注（メキシコ政府より）                               |                            |
| 70 | 中央研究所で GaAs MES FET 研究開発スタート<br>神津、NEC 入社（半導体事業部ダイオード部所属） |                            |
| 73 | 組織改編 超高周波部、発足<br>入江、神津を中心にした GaAs MES FET 開発チーム編成         | 第一次オイルショック                 |
| 74 | GaAs MES FET 市販開始   |                            |
| 78 | 中央研究所、玉川事業場から川崎市宮崎台へ移転                                    |                            |
| 79 |   | 電電公社、自動車電話サービス開始           |
| 80 | マイクロ波分野で GaAs MES FET のシェア 80% に                          | 富士通 HEMT 発表                |
| 81 |   | 大プロ「スーパーコンピュータ」スタート（89年まで） |
| 83 | GaAs デジタル IC、本格的に事業化                                      |                            |
| 85 |   | 電電公社、携帯電話サービス開始            |
| 86 | 化合物デバイス事業部、発足   |                            |

## 付属資料:NECの通信および半導体事業の沿革と概要

NECは1899年に通信会社としてスタートした。設立3年前の1896年、アメリカでの電話技術の進展に触発されて日本でも電話網の拡張が開始された。NECは、三吉電機の製造力とウェスタン・エレクトリック社の技術力を統合し<sup>25</sup>、このビジネスチャンスに食い込んでいったのである。それ以来、通信などの社会インフラ事業の比重は低下しているものの、NECは日本の通信機器産業をリードしている。

NECの半導体事業は、この通信機器事業を支える重要な役割を担ってきた。同社がトランジスタ開発を開始したのは1950年と日本企業では早かったが、当時は通信機器向けのダイオード生産に注力していたため、トランジスタの本格生産に乗り出したのは、トランジスタ市場が急速に拡大し始めた1950年代後半だった。1960年代後半になるとシリコントランジスタによって半導体市場の成長はさらに加速し、NECの半導体売上高は1964年時点で62億円に達した<sup>26</sup>。

通信機器事業においては、NECでは、戦前よりマイクロ波通信の研究を行っていたが、戦争中はレーダーの開発に切り替えさせられ、戦後もGHQによって禁止されていたため、先進国より立ち遅れていた。しかし、戦前からの技術蓄積と半導体技術が融合して、1963年には世界で始めて全てを固体化（真空管を半導体に変えること）したマイクロ波通信回線の実用化に成功した。NECではマイクロ波通信装置を電電公社、運輸省航空局、国鉄、電力会社など国内の大手顧客に納入するとともに、輸出も開始した。さらにマイクロ波通信技術は衛星通信という新たな分野にも応用されていった。1965年から1975年の10年間で、NECの技術はマイクロ波と衛星通信の分野で国内外に広く認められるようになっていった<sup>27</sup>。NECがGaAs MES FETを開発したのはこの時代のことであった。

その後、NECは、通信機器事業、半導体事業を中心に多くの情報通信分野に関わる総合エレクトロニクス・メーカーとして成長していったが、ITバブル崩壊後の事業不振により、2002年に汎用DRAMを除く<sup>28</sup>同社の半導体事業を半導体専門企業NECエレクトロニクス株式会社として分離独立させた。

現在、NECグループは、国内外のグループ企業の連携によって、NECを中心とした「IT/ネットワークソリューション事業」「モバイル/パーソナルソリューション事業」、NECエレクトロニクスを中心とした「半導体ソリューション事業」を展開している。2006年度のNECの売上高（連結）は4兆6526億4900万円で、うち半導体ソリューション事業の売上高<sup>29</sup>は

<sup>25</sup> NECは日本初の外国資本との合弁会社である。

<sup>26</sup> 半導体に占めるシリコントランジスタの比率は65年に5.5%であったが、70年には66.8%、76年には91.4%へと高まった。

<sup>27</sup> 以上のいきさつの参考として、付図1に通信事業におけるマイクロ波ブロックの売上高推移を取り上げた。

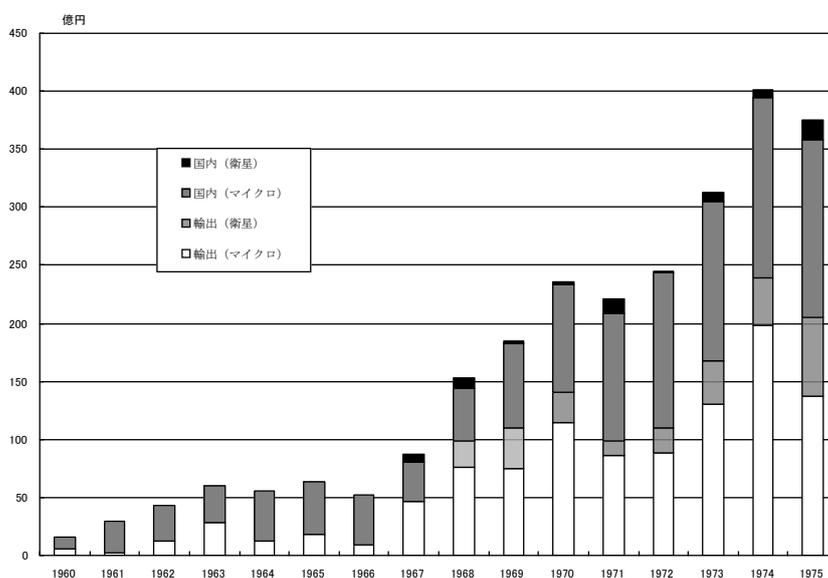
<sup>28</sup> 同社の汎用DRAM事業は、この分社独立に先立つ1999年に日立製作所のDRAM事業と統合され、NEC日立メモリ株式会社となった。この会社は2000年にエルピーダメモリ株式会社と商号を改め、日本における唯一のDRAM専業メーカーとなっている。

<sup>29</sup> 決算発表等におけるセグメント区分では、半導体ソリューションの他に電子部品事業等も含めた「エレクトロニクス事業」として表記されている。

8610 億 100 万円で、分野別売上全体の 18.8%を占めている（付表 1 参照）。

付図 1. NEC マイクロ波ブロックの売上高推移（1960 年～1975 年）

資料：『マイクロ波衛星通信事業 50 年の歴史』より作成



付表 1. NEC 分野別売上高（連結）

単位：億円

|                     | 2005年度 | 2006年度 | 2007年度 |
|---------------------|--------|--------|--------|
| IT/NWソリューション事業      | 27,624 | 27,588 | 28,662 |
| モバイル/パーソナルソリューション事業 | 12,503 | 9,650  | 8,729  |
| エレクトロニクス事業          | 8,159  | 8,610  | 8,309  |
| その他                 | 5,989  | 5,487  | 4,879  |
| 消去または全社             | -4975  | -4808  | -4407  |
| 合計                  | 49,300 | 46,526 | 46,172 |

資料：『NEC業績推移データ』（<http://www.nec.co.jp/ir/ja/material/data/index.html>）より作成

## IIR ケース・スタディ 一覧表／2004-2009

| 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<br>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 | 伊諒重<br>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<br>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<br>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<br>小林敦   | 「三菱電機: ポキポキモータ<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>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<br>金山維史<br>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<br>井上匡史<br>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<br>—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<br>高永才<br>古川健一<br>神津英明 | 「松下電子工業・電子総合研究所:<br>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<br>軽部大                 | 「川崎製鉄・川鉄マシナリー・山九:<br>革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現<br>大ブロックリング工法の開発」    | 2006年8月  |

|            |                      |   |            |
|------------|----------------------|---|------------|
| CASE#07-01 | 武石彰<br>宮原諄二<br>三木朋乃  | 「富士写真フイルム：<br>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<br>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<br>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<br>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<br>朱晋偉<br>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：<br>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<br>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：<br>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<br>北村真琴         | 「セイコーエプソン：<br>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<br>武石彰<br>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<br>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<br>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<br>積田淳史 | 「木村鑄造所：<br>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 |
|------------|--------------|---|------------|