

# 携帯電話用マイクロ波通信デバイスの研究開発

— 技術の潮流を読むことの大切さ —

石崎 俊雄  
Toshio ISHIZAKI

理工学部電子情報学科 教授  
Professor, Department of Electronics and Informatics



## 1. はじめに

昨今、携帯電話の普及は目覚ましく、全世界の年間生産台数は16億台を超え、日本においても普及率は約90%になっている。大学生も、ほぼ全員が携帯電話を所有しており、今や就職活動に無くてはならない必須アイテムとなっている。

このように今では周囲にあって当たり前の存在の携帯電話であるが、最初の携帯電話が1989年に登場してからわずか20年強のことである。この間の凄まじい小形化、高性能化、多機能化ならびに世界中への普及の歴史は、様々な歴史上の科学技術の進歩・普及と比べてみても特筆すべき事象となっている。

著者は、幸いなことに1983年から2010年までの約27年間、松下電器産業（現、パナソニック）において携帯電話用通信デバイス研究開発の最前線に携わることができた。本稿においては、携帯電話内部で使用されるマイクロ波デバイスの進化の観点から、その歴史を振り返ってみる。そして、著者が行ってきた数々のマイクロ波通信デバイス研究開発の内、本稿では特に積層セラミックを用いたフィルタとスイッチ共用器の技術に焦点を当てて解説を行う。その中で、今日の隆盛を見た携帯電話成功

の技術的な要因を述べるとともに、今後の携帯電話発展の方向性、ならびに他の科学技術の進歩・普及のためにお役に立てるようなお話が出来ればと考えている。

## 2. 携帯電話の歴史

### 2.1 セルラー方式

携帯電話による通信は、それ以前の短波通信などの無線通信が、通信する両者間を直接無線でつなぐ方式であったのに対して、基地局を介して両者間をつなぐという点で大きく異なっている。基地局間は通常有線通信ネットワークで結ばれている。そういう点で、携帯電話システムは、移動が可能な無線通信と複雑なネットワークが形成可能な有線通信の優れた特徴を組み合わせた、これまでに無い高度な通信システムであるということが出来る。

携帯電話以前にもこれに類似する通信システムが無かったわけではない。例えば、タクシー無線などの大ゾーンシステムと呼ばれるものがある。大ゾーンシステムでは、ひとつの基地局が半径30km程度のエリアをカバーするため、利用者はほとんど全てそのゾーン内に存在し、ゾーンを跨って使用することはほとんど想定されていない。

これに対して、携帯電話システムでは通常半径3

km 以下の小ゾーンで構成され、ゾーン間を跨って通信の受け渡しをするハンドオーバー、ならびにそのために必要な位置登録システムを有することが特徴である。小ゾーンのことをセル (Cell: 細胞の意) というため、このような携帯電話システムをセルラー (Cellular) 方式と呼ぶ。セルラー方式では、セルが隣接していなければ、同じ周波数の電波を混信無しに繰り返し再使用できるため、限られた周波数資源で大きな通信容量を実現することが可能になる。現在のように、多数の人が同時に携帯電話を利用することができるのは、この技術の恩恵によるところが大きい。

## 2.2 自動車電話から携帯電話へ

本格的なセルラー方式の移動体通信は、1979年に日本電信電話公社 (現、NTT ドコモ) が世界に先駆けて自動車電話として 900 MHz 帯を利用したサービス開始したのが始まりである。当時の無線機は容量 6600 cc で、車のトランクに据え付け、またアンテナは車の屋根に取り付けて使用するものであった。図 2-1 に最初の自動車電話機の写真を示す。無線機器の価格ならびに通話料金も高く、大会社の社長さんが黒塗りの車の中で使用する、いわばステータス・シンボルであった。それでも、移動体通信がビジネスにおいて発揮する利便性は十分に認識できるものであり、小型で安価な通信機の登場が望まれていた。ちなみに、その時の費用は、保証金 20 万円、月額基本料 3 万円、通話料が 6 秒 10 円というものであった。



図 2-1 最初の自動車電話機 (801 型)

## 2.3 小形化競争の時代

1985 年には、重量約 3000 g の可搬型端末 (いわゆるショルダーホン) が開発され、1987 年には体積 500 cc、重量 900 g の携帯端末が開発された。これらの移動通信携帯端末の写真を図 2-2 に示す。このような状況下で、1989 年モトローラが出した体積 220 cc、重量 303 g のマイクロタックが全世界に衝撃を与えた。これが、世界最初の「携帯電話」であったと言ってよい。

それから、携帯電話の熾烈な小形化・軽量化競争の幕が切って落とされた。早くも翌 1990 年には日本移動通信 (IDO) がミニモ P (体積 203 cc、重量 293 g) を出し、1991 年には NTT ドコモが満を持して初代 MOVA 4 機種 (それぞれ NEC、松下、富士通、三菱電機製) を発表した。中でも MOVA-P (図 2-3 左) は 170 cc、220 g であり、世界最小・最軽量を達成したものであった。この時代は、アナログ携帯電話と呼ばれる第 1 世代の携帯電話が使われていた。

この頃の携帯電話用デバイスの小形化技術については、著者らが著わした文献<sup>[1]</sup>に詳しい。これを寸評した Journal Review<sup>[2]</sup>においては、「これらの携帯電話の開発に携わっている技術者の話として、『メーカーは 0.1 g どころか、1 mg 軽くするのに必死の努力をしている。プリント板に部品を搭載する半田の量までコントロールするとか、ケースの厚さを薄くして落下試験を繰り返す。血のにじむような軽量設計を行った自分の担当製品が、町で女子高生に、飾りものを幾つもぶら下げられて扱われているのを見ると、あの苦労は一体何だったのだろうか」と泣きたくなる』と紹介されていた。まことに同感である。」と記載されている。

この後、毎年 1 回、さらには年 2 回のペースで春モデル・秋モデルが発表され、1 g・1 cc を争う激烈な競争時代が続く。そして、1999 年に、第 2 世代デジタル携帯電話で P 208 HYPER (図 2-3 右) がついに 57 g を達成して見掛け上の小型化競争が 1 段落したかのように見えた。



図 2-2 移动通信携帯端末  
左：ショルダーホン（100 型）  
右：携帯端末（TZ 802 型）

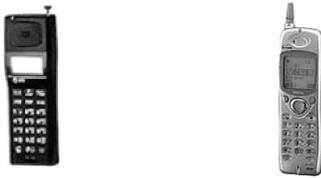


図 2-3 超小型携帯電話機  
左：MOVA-P，右：P 208 HYPER

## 2.4 世代の進化と多機能化

その後、1999 年に NTT ドコモにより i-mode サービスが開始され、携帯電話はそれまでの音声通話だけの機器から、メール通信機能、ブラウザ機能の付加した情報端末へと大きく変貌を遂げていく。その後、携帯電話の外形は、大きな液晶画面の採用やカメラ機能の追加、外付けメモリ機能の追加、GPS、無線 LAN、ワンセグなどのモジュール搭載でさらなる多機能化がなされた結果、むしろ大きくなっていく。しかし、外観の変化とは異なり、携帯電話中身の小型化は決して終わっていなかったのである。つまり、今までの中身をさらに小型化することで出来たスペースに新機能を組み込んでいくという競争に変質していった。

また、2001 年には、さらに高速大容量通信を可能とする第 3 世代携帯電話サービスが開始されている。これは、W-CDMA という全世界共通の方式であり、NTT ドコモでは FOMA という名で呼ばれている。初代の FOMA 端末としては、P 2101 V（重量 150 g：図 2-4）などがあるが、MOVA より大きく重くなってしまった。これは、無線周波数や通信



図 2-4 第 3 世代 FOMA 携帯電話（P 2101 V）

方式が変わったために今までに使っていなかった新しいマイクロ波通信デバイスなどが必要になったためである。これらが、小型化されるために数年の歳月を要したが、再び小型化に成功し、さらなる小型化が達成されている。

その後、世界的な携帯利用者数の爆発的な増加により複数の周波数帯域の中から空いた帯域を自動的に識別して使用するマルチバンド機や、世界中どこでもどの方式でも使えるマルチモード機が登場し、それが当たり前のことになっている。皆様がお持ちの携帯電話機もかなりの割合で、最大 5 つのバンド／モードに対応した機種になっている可能性が高い。つまり、意識しないうちに、昔の携帯電話 5 台分の機能を持ち歩くようになったわけである。事これほどに、小型化の流れは強烈であった。

## 3. 小型化がもたらしたものの

携帯電話は、自由に持ち歩くというその本来の目的からして、小型化は必須の条件ではあるが、小型化がもたらした恩恵は単にそれだけではない。自由に持ち歩けるという利便性だけでは、携帯電話は決して現在のように普及することはなかったであろう。それでは、何が携帯電話をして、これほどまでに世界中に普及せしめることになったのであろうか。それは、誰でも購入できる低価格を実現してきたことが、世界中の人々が使うようになった最大の理由である。ここに、デバイスの小型化が大きく密接に関与している。

ここで次のような疑問を持たれる方もいらっしゃるかもしれない。デバイスの小型化は多くの技術者が血の滲むような努力をして開発した高価なハイテ

クを駆使してできたものである。小さいデバイスは微細加工が必要で製造機械にも高価なものが必要である。そもそも、携帯電話機は小形のものこそが高級機種であり、人気もあるので値段が高くて当たり前だ。したがって、小形化が低価格化に貢献したというのはおかしい。

この考え方は、最後の結論以外はほぼ正しい。すなわち、小形携帯電話の研究開発には世界中で莫大な研究開発費が投下され、微細加工の製造設備の価格も概して高額になる。しかし、これらの固定費（生産台数によらずに掛かる費用）は、いわゆる量産効果によって薄められる。つまり、携帯電話1台あたりのこれらの費用は、総費用を企画台数で割ればいいので、たくさん売れてたくさん作れば、たとえ費用をかけてもこの部分の価格は安くなる。しかし、携帯電話は小形化により、量産効果だけでは達成できない、それ以上の価格低下を実現した。量産効果で低コスト化できない部分とは、すなわち材料費や比例費（生産台数に比例して掛かる費用）と言われる製造コストのことである。

これに関しては、デバイス小形化によるデバイスの多数個取りや小形集積モジュール化による製造コスト低減が有効であった。つまり、デバイスの小形化によりコスト低減ができるのである。例えば、10 cm×10 cm のワークサイズから1 cm×1 cm のデバイスを製造すると100個のデバイスが製造できる。このデバイスサイズが5 mm×5 mm に小形化できれば同じワークサイズで400個が、2 mm×2 mm になれば実に2500個のデバイスが取れるのである。1枚のワークサイズの製造に必要な材料費や製造費用はほとんど変わらないので、約4分の1から25分の1の低コスト化が可能になる。

小形集積モジュール化の効果はこれほど明確ではないが、例えば100個の部品を購入してプリント基板上に実装する回路を1個の小形集積モジュールに置き換えることができれば、セットメーカーにおいてはかなりの低コスト化が出来る。ただし、そのモジュールは例えば100個の部品を実装して作るモジ

ュールのような屋上屋を重ねるものであってはだめである。その場合は、セット製造での手間は省けるが、コストは逆に高くなる可能性がある。モジュールは、小形集積化によって一括製造が出来る集積モジュールであることが必要であり、そのようにすると10分の1の低コスト化も可能になる。

#### 4. 日本のデバイスメーカーが支えた世界の携帯電話の進化

日本はIT大国で携帯電話でも世界の先進国だというのはある意味で誤りである。日本は、優れた移動体通信技術を世界に先駆けて開発してきたという実績はある。先に述べたように、セルラー方式の移動体通信は日本電信電話公社が世界に先駆けてサービスを開始した。第3世代携帯電話のサービスも、NTTドコモが世界に先駆けて2001年に開始している。しかし、技術的には優れていたが、逆に日本独自方式にこだわることになり、また、日本独特の周波数配置を永らく世界の趨勢に合わせる事が出来ず、政策的な世界戦略を打ち出せなかった。そのため、日本の携帯端末メーカーは、年間需要1000万台である日本市場では圧倒的な優位を保てたが、年間需要16億台の世界市場ではノキア、サムソンなどの海外勢の前に全く歯が立たなかった。これには、低価格よりも高性能を追求してきた、或いはせざるを得なかったという日本の端末メーカーの商品戦略も大いに影響している。日本は携帯電話のガラパゴスと言われるのは、このような事情があったためである。

これに対して、携帯電話用デバイスの製造では、日本メーカーは世界を席巻しているのである。例えば、村田製作所、京セラ、パナソニックエレクトロニックデバイス、TDK、富士通メディアデバイス、太陽誘電、双信電機など列挙にいとまがない。これらのデバイスメーカーは、日本の端末メーカーに高機能なデバイスを供給しつつも、かなり早い時期から世界中の携帯端末メーカーにデバイスの供給を行っていた。日本の携帯端末の年間需要1000万

台というのは、端末メーカーにとってはこれを数社で分け合ってもそこそこ利益を出せる魅力的な市場であるが、デバイスメーカーが生き残るためには小さすぎる市場である。これは、商品単価の違いが大いに影響している。つまり、携帯端末は1台が約5万円であるのに対して、デバイスは1個10円から100円と桁違いに安いのである。したがって、最初から販売額を確保するためにどうしても世界に打って出る必要があった。また、日本の端末メーカーも自社に供給される高性能デバイスの価格を下げるため、世界仕様に合わせた汎用デバイスをデバイスメーカーが積極的に海外で販売することを奨励した。なぜなら、前述のように製造設備の稼働率を上げれば固定費が量産効果で薄まり、日本の端末メーカーも低コスト化の恩恵を受けることが出来るからである。このように、日本のデバイスメーカーは日本の端末メーカーの下で高い技術力を磨き、その技術力を背景にデバイスの低コスト化を進めて世界で勝負するという図式が出来上がった。日本のデバイスメーカーは日本の端末メーカーによって技術力を鍛えられ、世界に進出していった。

日本の端末市場が飽和してきた後は、日本の端末メーカーに変わり、世界の巨人であるノキアがデバイス開発を引っ張り、多くの日本のデバイスメーカーがそれに呼応していった。ノキアは携帯端末を年間5億台以上生産する携帯電話端末メーカーのトップであるが、その開発戦略には特筆すべきものがあり、現在の携帯電話普及に果たした役割は大きいので、以下にそのデバイス調達のやり方をご紹介します。

## 5. ノキアの戦略

多くのセットメーカーが端末コストの低減のため、特性スペックを満足するデバイスの中から最も価格の低いデバイスを採用し、さらに低コスト化のために、各デバイスメーカーに厳しい価格競争をさせたというのは、ごく自然な流れであった。

携帯電話黎明期にあって、ノキアは弱小の2流企

業であった。当時、世界の携帯電話界をリードしていたのは、前出のアメリカのモトローラ、そしてスウェーデンのエリクソンであり、両社は世界で最も歴史のある通信機器メーカーとして携帯電話の開発・生産においても世界に君臨するものであった。当初、ノキアもそれら通信機器メーカーに倣って、同様のデバイス調達を行っていた。もし、ノキアがその後もそのやり方を継続していたなら、今日の地位は絶対に有り得なかったと考えられる。

元々、携帯電話はモトローラやエリクソンのような通信機器メーカーが手掛けることによってスタートしており、彼らのコアコンピタンス（中核となる力）は無線回路設計技術である。よって、彼らにデバイスを納入するデバイスメーカーは言わば下請けメーカーとしての認識であった。デバイス購入の決定権はバイヤーとしての購買にあり、判断基準は価格の安さであった。

これに対して、ノキアは、モトローラ、エリクソンに追いつき追い越すため、大胆なデバイス調達戦略に打って出た。ノキアは、小形高性能な新規デバイスをデバイスメーカーに開発させ、大量に安く購入することによって、良い携帯端末を作り、世界シェアを取っていく戦略を取った。ある意味、無線回路設計技術では先陣を切る通信機メーカーには敵わないのでそれは放棄し、使用するデバイスを高性能・低コスト化することで逆転を狙ったのである。そのために、ノキアはグローバルソーシングという開発購買部門を創設し、そこにはバイヤーではなく、同社の最も優秀な技術陣を回した。すなわち、無線回路設計よりも、新規デバイス開発・調達を優先する姿勢を明確にした。

低価格のデバイスを求めて次々とサプライヤーを変えていくのではなく、ノキアはある選定されたデバイスメーカーと強力なパートナーシップを築き、数年間掛けて新デバイスを協力して開発し、そのデバイスを用いたプラットフォームをその後何年間かは使い続けるというというやり方を取った。デバイスメーカーにすれば、新規に開発したデバイスをそ

の後何年間かは継続して大量に使ってもらえるため、安心して研究開発投資を行うことができた。また、ノキアにとっても、共通化したプラットフォームを使い続けることによって、端末新機種の開発投資を低く抑えることが出来、価格競争で有利になるという大きなメリットがあった。大体、ひとつのプラットフォームで5機種から10機種ぐらいが展開され、最終ユーザーから見れば機能や外観デザインの違いの魅力的な携帯電話端末の品揃えがされているため、非常に好評であった。

ノキアがデバイスメーカー選定にあたって、デバイスメーカーに提出を求めたのは、5年間から10年間程度に渡る価格のロードマップ、それを裏付ける技術開発のロードマップ、そして他社技術と比較したベンチマーク表である。低価格化の根拠を技術開発に求めていることが大きな特徴である。これらを前出のグローバルソーシングの技術者とデバイスメーカーの技術者が徹底的に議論を行い、複数のデバイスメーカーの中から2社を選ぶという形を取る。最終的に1社にしないのは、何らかの事故で供給ストップになるリスクを避けるためである。1社目は過半数、通常70~80%程度のシェアを得ることが出来るが、2社目でもかなりの数の受注を保証されているので工場を稼働し続けることが出来、いざという時にすぐに増産ができるようになっている。ただし、2社目に課せられる大きな難問は、1社目と性能や端子位置を同じにしてすぐに置き換えが出来るコンパチビリティが求められることである。1社目の技術が独創的で最先端の物であればあるほど、これはかなりハードルの高いものである。しかし、結果的には多くのデバイスメーカーの並々ならぬ努力もあり、デバイス技術の高位平準化と好ましい競争をもたらすこととなって、今日の携帯電話の隆盛に繋がったことは確かである。

## 6. 私の携帯電話用デバイス開発について

### 6.1 携帯電話無線部の構成

著者は通信デバイスの開発で、前述のような環境

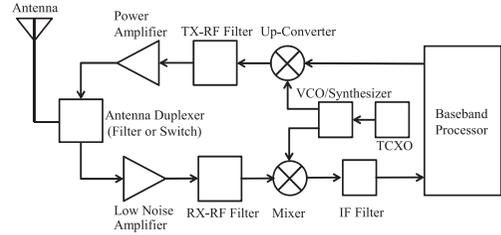


図 6-1 携帯電話無線部の構成の概略図

の渦中にずっといた。著者は高周波フィルタやスイッチ共用器やパワーアンプなど、様々なデバイスの研究開発を行ったが、本稿では積層セラミックを用いたフィルタとスイッチ共用器について述べる。

詳細の説明に入る前に、まず携帯電話端末無線部の構成について説明する。図 6-1 は、携帯電話無線部の構成の概略図である。図 6-1 において、上側半分は送信系、下側半分は受信系である。送信系はベースバンド信号を一気に無線周波数 (RF) に変換するアップコンバート方式、受信系は無線周波数をいったん中間周波数 (IF) に変換するスーパーヘテロダイン方式の場合を示している。VCO/Synthesizer は周波数可変発振器、TCXO はその基準となる高安定の水晶発振器である。また、アンテナ共用器 (Antenna Duplexer) は、フィルタもしくはスイッチで構成され、1本のアンテナを受信機と送信機で共用するためのデバイスである。また、TX-RF Filter, RX-RF Filter は必要な電波だけ通して不要な雑音や不要な妨害電波を取り除くフィルタである。Power Amplifier は電波を強くしてアンテナから送信するための増幅器であり、Low Noise Amplifier は受信した微弱な信号が雑音でかき消されないように強めてやる増幅器である。このように、携帯電話は様々な通信デバイスで構成されている。

## 6.2 積層プレーナフィルタの研究開発

### 6.2.1 それまでの誘電体同軸フィルタ

携帯電話初期のころは、TX-RF Filter, RX-RF Filter として誘電体同軸フィルタが用いられてきた。図 6-2 は誘電体同軸フィルタの外観写真を示して

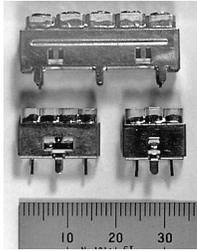


図 6-2 誘電体同軸フィルタ

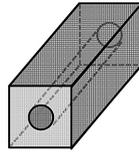


図 6-3 セラミック同軸共振器

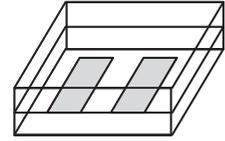


図 6-4 ストリップライン共振器 (2 個配置)

いる。大きさは、ピンの部分を除いても  $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  ほどの体積がある。複数個のセラミック同軸共振器をコンデンサを介して結合させ、帯域通過フィルタを構成している。図 6-3 にセラミック同軸共振器の斜視図を示す。それぞれのセラミック同軸共振器は、外形が長細い直方体の長手方向中央に貫通孔が空いた形状のセラミック焼結体に、表面を銀などの厚膜導体で覆った構造体になっている。4 分の 1 波長共振器の場合は、ひとつの端面だけをオープンにするため、その面の銀導体を削り落とす。2 段フィルタの場合の構成部品は、共振器 2 個、入出力結合コンデンサ 2 個、段間結合コンデンサ 1 個、コンデンサなどを実装する基板、金属ケース、そして入出力端子と多数の部品が必要である。

### 6.2.2 LTCC 技術を用いた新フィルタの構想

この誘電体同軸フィルタの超小型化を実現するために、当時ようやく実用化が始まろうとしていた低温同時焼結セラミック (LTCC: Low Temperature Co-fired Ceramics) を使うことを考え、社内のセラミック材料技術者とともに開発に着手した。世界に先駆けて超小型フィルタを開発するためには、材料が完成してからデバイスの研究に着手するのでは遅く、材料とデバイスの同時開発を行う必要があった。その時点で LTCC は低い周波数のデバイス用には一部使われ始めていたが、携帯電話の周波数である  $900\text{ MHz}$  で使えるような特性の良いものはまだなかった。

LTCC の焼結温度はおよそ  $950^\circ\text{C}$  以下であり、これを低温というのは銀や銅や金などの良導体の融点

よりも低いという意味である。例えば、よく使われるアルミナなどの焼結温度は  $1600^\circ\text{C}$  程度あり、アルミナ上ではそれらの金属は溶けてどこかに流れ出してしまい、デバイスが作れない。LTCC では、生のセラミックシート上に導体パターンを印刷して積層してプレスする。そして、個片プロセスでは先に切断して個片にした後に焼成し、一体プロセスでは先に焼成した後に個片に割る。いずれも、一つのワークシートから多数のフィルタが製作できることが特徴である。

LTCC を用いたフィルタでは、図 6-4 に示すようなストリップライン共振器が用いられている。図では、中央のセラミックシート上にストリップライン共振器を 2 個配置した場合を示している。すべての構成部品はセラミックシート上もしくは外面上に印刷で形成された金属電極パターンで形成されており、材料としてはセラミックシートと金属導体ベースがあれば十分であり、他に必要となる部品はない。このように、LTCC 積層フィルタは、多数個取りの面で見ても集積モジュール化の面で見ても本質的に小形化・低コスト化できる格別の素性の良さを備えていた。著者は、この新しい構成のフィルタを平面型フィルタであるという意味を込めて、「積層プレーナフィルタ」と名付けた。

### 6.2.3 未知の技術課題との遭遇

このフィルタの研究開発に関わる材料開発以外での技術的な課題を次に示す。通常、フィルタは小形化すると損失が大きくなる。これは、導体の狭い領域に電流が集中することによって抵抗損が増えるた

めである。例えば、太い電線は抵抗が小さいので損失が少ないが、細い電線は電流が集中するため抵抗が大きくなり損失が多くなるのと同じである。小形にしても性能を落とさないためには、この抵抗損を減らす工夫が必要である。そのため、ストリップライン共振器の近くには電流を流す金属体をできるだけ近づけないようにする。そこで、ストリップ共振器間にはシールド電極を設けないことで低損失化を図った。図6-4で、誘電体シートの最上層と最下層には図示はしていないが、外部から妨害電波が飛び込んでこないようにするためのシールド電極が設けられている。これはどうしても外すことはできない。ところが、図6-4で示す2つのストリップライン共振器間にシールド電極は無い。この点は、従来の同軸共振器の中心導体の周りが外導体で覆われて、1個1個の共振器が電氣的にも物理的にも分離されているのと大きく異なっている。

実は小形化による損失増加を避けるためのこの工夫が、今までの誘電体同軸フィルタでは起こり得なかった2つ目の大きな技術的な課題を引き起こした。一般に、2つの伝送線路が近付くと両者は電磁界結合し、干渉を引き起こす。この干渉自体は悪いことではなく、フィルタにおいては共振器と共振器を干渉させて帯域通過特性を実現する。このようなフィルタとしては古くからコムライン<sup>[3]</sup>が知られていた。この干渉（すなわち結合）には望ましい値がフィルタ特性によって決まっており、狭帯域であれば結合は小さく、広帯域であれば結合は大きくなければならない。ところが、開発を目指しているフィルタではサイズを極限まで小さくしようとしていたので、2つのストリップライン共振器の間隔は1mm以下と非常に狭く、とてつもなく大きな結合になってしまうのである。これでは帯域幅が異常に広がるため、除去したい妨害電波もすべて通してしまっ、フィルタの機能を全く果たせない。

企業の研究では、ともかく期限までに何らかのよい結果を出さないとライバル他社に負けて大きな経済的な損失を被ったり、最悪の場合はその事業から

撤退ということになる。そこで、最初はスマートに理論的なアプローチを試みていたのであるが、現状を打開するために藁にもすがる思いで試行錯誤を重ねていくことになった。ある時、逆に結合を強くするためにストリップライン共振器間に段間結合コンデンサを接続したらどうなるだろうかということをつままたま思いつき実行してみた。特性はさらに広帯域になって劣化するという予想であったが、意に反して結果は帯域幅がむしろ狭くなり、かつ、周波数特性に急峻な谷が生じるという、今までに見たこともない特性が観測された。この現象は、過去の論文などで報告されたことのない未知の物であった。通常であれば、理論に合わないので、多分実験ミスではないかと済ませてしまうところであろう。しかし、前述のようにともかく切羽詰まった状況であったので、たとえ実験ミスであろうがこの現象を何とか制御して利用できないかという思いがあり、原因究明に乗り出した。すると、この現象はかなり再現性よく発生し、しかも結合容量の値に応じて明確な傾向を示していることがわかってきた。そこで、共振器間の結合度を電界成分による結合と磁界成分による結合に分けて詳細に検討してみた。電界結合も磁界結合も結合ではあるが、実は符号が逆である。前出の文献<sup>[3]</sup>で報告されているコムラインフィルタでは主に磁界結合を使っている。このフィルタではサイズの小型化に伴い、2つのストリップライン共振器の間隔を異常に狭くしたため、磁界結合が強くなりすぎていたのである。そこに、段間結合コンデンサを接続したため、コンデンサを通じた結合が電界結合として働き、結果的に共振器間の結合を弱めるということがわかった。また、電界結合量と磁界結合量が等しくなると両者が打ち消しあい、周波数特性に急峻な谷を生じさせていることも確認できた。このことから、一見構造的には全く異なる、空間的な電磁界結合と回路素子を通じた回路上の接続の両者を統一的に扱えるという新しい知見が得られたのである。

原理が解れば、次の段階はこの現象を定式化し

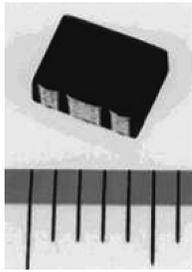


図 6-5 開発された積層プレーナフィルタの外観写真

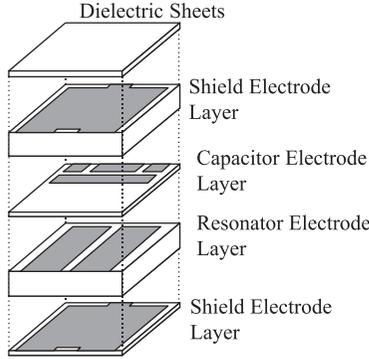


図 6-6 積層プレーナフィルタの内部構成

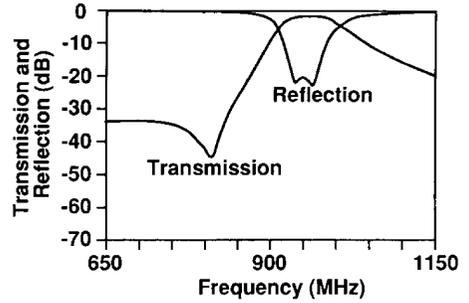


図 6-7 積層プレーナフィルタの特性例

て、フィルタの設計理論に組み込むことである。ここでは詳細は述べないが、その内容は国際マイクロ波学会で発表するとともに、フルペーパーとして IEEE の論文誌に掲載された<sup>[4][5]</sup>。その結果として、新しい原理に基づく「積層プレーナフィルタ」が開発でき、従来の誘電体同軸フィルタの実に 20 分の 1 の小形化を一挙に達成したのである。最初の積層プレーナフィルタの外観写真を図 6-5 に、その内部構成を図 6-6 に、そしてその特性例を図 6-7 に示す。損失は従来フィルタと同等であり、さらには副産物として周波数特性に急峻な谷（これを減衰極と呼ぶ）を所望の周波数に作る事が可能になり、従来フィルタよりもさらに高い選択度を実現することが出来た。その後、いろいろ解析したところによると、通過帯域のできるだけ近くに減衰極を作る（すなわち高選択度を実現する）には、共振器間の電磁界結合をさらに強くした方が良いことがわかった。

最初は、致命的な欠点であると思っていた共振器間の電磁界結合ではあるが、逆手にとって上手に利用してやれば、従来フィルタの特性を凌ぐ長所となってまた自分のところに戻ってきたのである。

### 6.3 LTCC スイッチ共用器の研究開発

#### 6.3.1 スイッチ共用器の始まり

1 本のアンテナを送信機と受信機で共用するため

のデバイスであるアンテナ共用器は、フィルタの組み合わせ、もしくはスイッチで構成されることは既に述べた。第 1 世代のアナログ携帯電話や第 3 世代の W-CDMA 方式は周波数分割複信 (FDD) なので共用器はフィルタ方式でなければならないが、第 2 世代デジタル携帯電話である NTT ドコモの MOVA が採用している PDC 方式や現在でも世界標準である GSM 方式は時間分割複信 (TDD) であり、かつ送受信で使う周波数を違えているため、スイッチ方式でもフィルタ方式でもどちらでも対応することが出来る。時分割というと、送受信をプレストークスイッチで切り替えてそれぞれ交互に通話するトランシーバの半二重通信のようなイメージを持たれるかもしれないが、実際にはデジタル信号処理により音声を圧縮して極めて短時間に送受信を切り替えるので、利用者にとっては音声途切れることのない全二重通信として認識される。

歴史的に携帯電話では、FDD であるアナログ携帯電話から始まったため、初期の頃のアンテナ共用器はフィルタ方式というのが常識であった。やがて第 2 世代の PDC 方式、GSM 方式が始まっても相変わらずアンテナ共用器はフィルタ方式であった。著者が 1992 年に GSM 携帯電話端末の製造が始まろうとしていたイギリス松下通信を訪問した際、当地の技術責任者からフィルタ方式のアンテナ共用器ではどうしても端末の小形化できないので何とかス

スイッチ方式の共用器を開発して欲しいという要請を受け、研究開発に乗り出した。当時、スイッチ方式を採用したアンテナ共用器は世界中のどこにもなかった。それで、まず開発したのが、スイッチ方式とフィルタ方式の良い所取りをしたハイブリッド型のスイッチ共用器であった<sup>[6]</sup>。今までにない新しい物を作り出す苦勞はいろいろとあったのであるがここではその説明は本筋ではないので割愛する。完成したデバイスはイギリス松下通信で商品に採用され、端末の小形化に貢献した。非常に良いものが出来たのでヨーロッパの他社にも売り込もうということで、ヨーロッパの大手携帯電話端末メーカーを一通り訪問して説明した。各社とも、その小ささと特性の良さを称賛してくれたが、残念ながら採用には到らなかった。その理由は、使っている IC がフィルタ式のアンテナ共用器を前提に作られているため、スイッチの制御端子が無いからという理由であった。デバイスは、セットやシステムの中で使われているため、ひとつのデバイスだけが良くなってもダメで、それを使いこなせるように他のデバイスも進化しなければならないという現実を痛感したものであった。

そのような中でも、上記のような評判を聞きつけ、日本の PDC 方式でもスイッチ共用器を用いて小形化したいという話が松下通信工業（現、パナソニックモバイルコミュニケーションズ）の技術責任者からあった。日本の PDC 方式は、ヨーロッパの GSM 方式と違い、ダイバシティという受信を 2 系統持つ方式であるため、フィルタは送信フィルタ 1 個と受信フィルタ 2 個で計 3 個必要となり、小形化のためスイッチ方式にする必要性が GSM よりも強

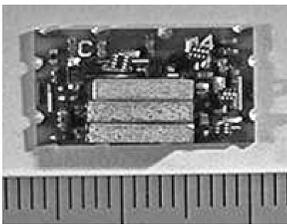


図 6-8 PDC 用スイッチ共用器

かった。この PDC 用スイッチ共用器の外観写真を図 6-8 に示す。この共用器は他のセットメーカーでも幅広く使われ、他のデバイスメーカーもこれの開発・製造にこぞって追従してきた。

### 6.3.2 LTCC スイッチ共用器の研究開発

1993 年には、ヨーロッパで 900 MHz 帯 GSM バンドの混雑を緩和するため、1800 MHz 帯の DCS 方式（周波数と出力電力以外は GSM と同じ）を併用するデュアルバンド機が登場することになった。デュアルバンド機は、アンテナ共用器が 2 個必要（フィルタ換算だと 4 個必要）なので、ここに到っては小形化が必須となり、IC メーカーもスイッチ制御出力を持つスイッチ共用器対応の IC を開発した。前述の PDC 用スイッチ共用器は図 6-8 の写真からもわかるように、まだ多数の部品をプリント基板に実装した実装型モジュールであったが、積層プレーナフィルタと同じように LTCC を使った小形集積モジュール化が図られた。

これがきっかけで、村田製作所、パナソニックエレクトロニックデバイス、TDK、日立金属など多くのデバイスメーカーが一斉に LTCC スイッチモジュールの研究開発に注力することになった。この頃には携帯電話が世界的に大ブレイクをし始めており、いきなり年産数百万個の生産を立ち上げるといって、過去に例を見ないような量産立ち上げが行われた。前述のノキアが先頭に立ってこれを強く後押しした。ここに、日本のデバイスメーカー各社がしのぎを削る大競争が勃発した。この市場は巨大なものになり、著者が開発したノキア向けの製品だけでも累計生産台数 1 億台を優に超えるものであった。

図 6-9 に LTCC スイッチ共用器の外観写真を示す。このスイッチ共用器に使われている LTCC は比誘電率 7.4 であり、前述の積層プレーナフィルタで用いた LTCC（比誘電率 58）より低誘電率の材料が使われている。図 6-10 にデュアルバンドスイッチ共用器の回路ブロック図を示す。アンテナからの信号は、ローパスフィルタとハイパスフィルタからなるダイプレクサで 900 MHz 帯 GSM と 1800

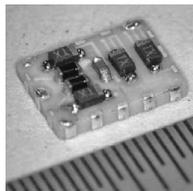


図 6-9 LTCC スイッチ共用器の外観写真 (シールドケースを外した状態)

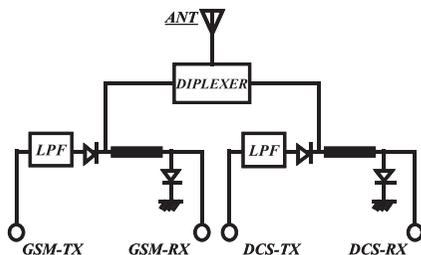


図 6-10 デュアルバンドスイッチ共用器の回路ブロック図

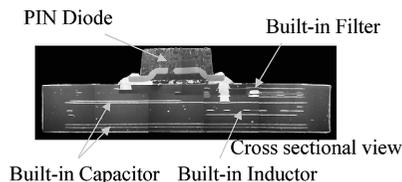


図 6-11 LTCC スイッチ共用器の断面写真

MHz 帯 DCS 信号に振り分けられ、それぞれ PIN ダイオードスイッチにより、ダイオードがオンの時は送信側 (TX) に、オフの時は受信側 (RX) に接続される。ダイプレクサや送信側のローパスフィルタは LTCC 内部にパターンで作られ、PIN ダイオードや一部チップ部品は LTCC 積層体の上にはんだで実装されている。図 6-11 は、LTCC スイッチ共用器の断面写真である。LTCC 積層体内部に、電極パターンによりキャパシタ、インダクタ、そしてフィルタが構成されているのがわかる。

### 6.3.3 LTCC スイッチ共用器の技術課題

LTCC スイッチ共用器の技術課題は、この回路がパターンの形だけで所望の電気性能を実現する分布定数型素子を集積した回路であるという点である。それ以前にも分布定数回路はもちろんあったが、単純な LC 回路や整合回路という単品として形成されるものであり、このようにいくつもの素子や回路部品が複雑に接続されて構成される回路というものはなかった。これで何が難しいかというと、個々の素子や回路部品の特性を個別に確認することが出来ないということである。LTCC は焼結する際に約 20% 程度収縮し、設計ではそれを見越したうえでパターンを作成している。したがって、個々の素子が設計通りの性能になっているかどうかを確認したいのであるが、全ての素子はつながった状態で LTCC 積層体の内部に形成されているので、個々に分離することが出来ない。たとえ、部品 1 個 1 個を分けて作ったとしても、それを測定するための入出力端子

が必要で、その端子まで LTCC 内部で配線を引き回すと、結局部品だけの特性が分らないということになる。

回路特性を確認する方法としては、3次元の全パターン詳細を CAD 入力し、それを電磁界シミュレータを用いてフル電磁界解析を行い、力づくで解く方法もないわけではない。しかし、最新鋭のコンピュータを用いたとしてもメモリ容量や計算速度の限界から、パターンの粗い近似に対して 1 週間程度の計算時間を掛けて近似解を求めるのが精一杯である。特性の確認には使えても、とても設計に使えるものではない。そこで、個別素子特性のデータベースと電磁界解析や回路解析を巧みに組み合わせた設計ツールの開発が行われた。これにより、回路としての設計ができるようになったが、これで問題が収まったわけではなかった。

それは、LTCC スイッチ共用器の内部を高密度化し、さらに小形化を実現しようとする中で特に問題となった。もう一度、図 6-11 の断面写真をご覧頂ければお分かりかと思うが、LTCC 積層体の中には各部品を仕切るためのシールド電極は入っていない。これは、積層プレーナフィルタの時と同じく、シールド電極による抵抗損を減らすためである。このため、横方向で近接したり上下方向に重なった場合にはパターン同士が強く結合し、等価回路上で予想していない信号経路ができるため、思いもよらぬ特性になることが多々ある。先ほどのフル電磁界解析を用いれば寄生成分による結合で特性が劣化する

ところまでは確認できるのであるが、それでは特性が悪かった場合どこを手直しすればいいかというところでハタと困ってしまう。

そこで著者は、マイクロ波シミュレータのメーカーでもあるアジレント・テクノロジー社にその問題を解決するソフトウェアを作ってもらえないかという相談を投げかけた。著者の考えでは、同社が開発販売しているモーメント法を用いた電磁界シミュレータでは、計算の途中段階で任意の2点間の相互影響がすべて計算されているので、これを利用することができないかというものであった。このようなアイデアは持っていたものの、本当にできるかどうか、海の物とも山の物ともわからない研究開発に対して、同社日本法人からは非アメリカに行つて実際に開発している部隊と議論して欲しいという要請を受け、同社研究所のあるカリフォルニアのサンタローザという街を訪ねた。そこはサンフランシスコからバスで2時間ほど掛かる郊外の小都市であり、その見知らぬ土地を部下と二人で訪れた。そこは、ワイン醸造所で有名なソノマ、ナパなどのワインどころのど真ん中である。私たちを歓迎してくれたアジレント社の技術者たちは、私の提案について、可能性はあるが実現できるかどうかはわからないという正直な見解を示してくれた。そのようなリスクの高い研究プロジェクトを進めるかどうかを最終判断しないといけない場面で、同社の日系人の最高技術責任者は、「是非やってみましょう。なぜなら、私はマイクロ波を愛しているからです。(Of course, we can do. Because I love microwave!）」と言って快諾してくれた。彼のマイクロ波技術に対する愛着、そしてリスクは高いものの、これに成功すれば技術の大きな進歩になるという挑戦する技術者としての精神に非常に深い感銘を受けた。その夜は、ホテルのレストランで部下と上質のカリフォルニアワインで乾杯をしたことは言うまでもない。

このソフトウェアは LTCC デバイスの設計において非常に有効なツールとなる。まだ、一般には市販されていないが、いずれアジレント社のシミュレ

ーションソフトウェアのプラットフォーム上に載せられて今後の研究開発に多大な貢献するものと思っている。

#### 6.4 LTCC デバイスの展開

このように LTCC が携帯電話の小形化、低コスト化に大きなインパクトを与えるということを一番の確に認識していたのは、やはりノキアであった。LTCC スイッチ共用器が出来た後は、さらなる小形集積化を日本のデバイスメーカーとともに強力に押し進めていった。

図 6-12 は、拡張した LTCC モジュールの概念を示している。前述のスイッチ共用器は図中 ASM (Antenna Switch Module) と記されている。これと SAW フィルタを集積したものが図 6-13 に示すフロントエンドモジュール (FEM) である。また、パワーアンプ (PA) と集積したものが図 6-14 に示す TX モジュールである。そしてさらにそれら3つ全てを統合するものが RF モジュールと呼ばれるものである。

図 6-15 は、LTCC デバイスの展開図である。初期の頃の多数の個別部品を実装して使うという形態から、次のステップとして LTCC によって小形集積モジュール化が行われ、携帯電話の小形化、低コ

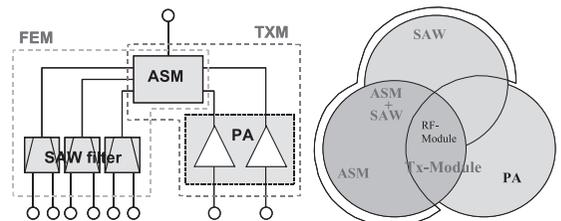


図 6-12 拡張した LTCC モジュールの概念

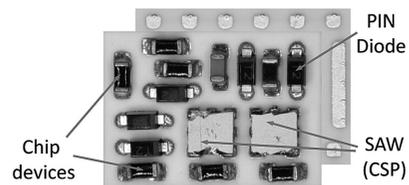


図 6-13 フロントエンドモジュールの外観写真

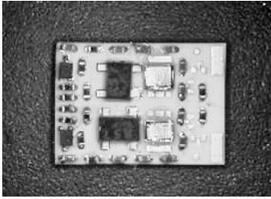


図 6-14 TX モジュールの外観写真

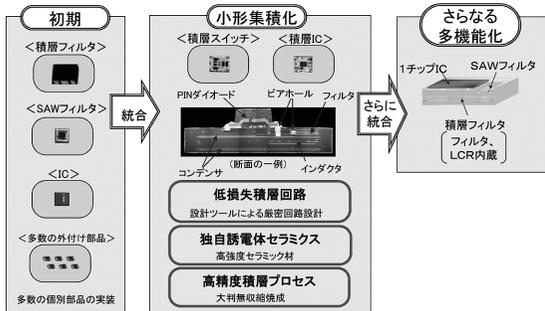


図 6-15 LTCC デバイスの展開図

スト化を進める強力な推進力となった。そして、次に求められるものは携帯電話の多機能化に対応した LTCC デバイスの多機能化であり、無線 LAN モジュール、Bluetooth モジュール、ワンセグモジュールなどに LTCC を適用して出来る小形・低コスト化である。これらは、既に一部商品化されている。

## 7. 現在の携帯電話用デバイスの抱える課題

例えば、前出の RF モジュールを実現するためには、LTCC 技術、SAW フィルタ技術、PA 技術の 3 つの技術を揃えなければならぬので実現は容易ではない。著者が勤務していたパナソニックはこれらすべてを持つ世界で唯一の会社であったのだが、残念ながらそれでも部署が違くと連携が取り難く結局在職中にはできなかった。現在では、半導体メーカーとデバイスメーカーが連携して開発を行っている状況である。このように集積化のための技術が多岐に渡ると 1 社ですべてを自前で賄うのは不可能になってくる。このため、会社の垣根を越えた世界的な共同作業が重要となる。

また、デバイス開発をめぐる状況もここにきて変わってきている。先に述べたとおり、これまでのデ

バイス開発はノキアなどの端末メーカーがけん引していた。しかし、携帯電話用の高周波 IC の技術がこなれて汎用化し、デバイスの形もある程度固まってきた現在では、端末メーカーを飛ばして半導体メーカーとデバイスメーカーが直接協力するという形が普通になってきた。半導体メーカーの半導体 IC カタログに、推奨の使用デバイスがレファレンスとして掲載され、多くの端末メーカーがそれをそのまま採用するというやり方である。

これにより、デバイス開発の先導役が不明になってきた面はあるが、他方では中国や台湾の携帯電話メーカーがレファレンスをそのまま使って、非常に安い携帯端末を大量に作れる時代になった。また、最近人気の i-Phone で有名なアップル社も携帯電話では全く経験がなかったが、短期間に魅力的な端末を開発できたのにはこのような背景がある。

## 8. おわりに

以上、携帯電話の歴史と、小形・低コスト化を推進してきた通信デバイスの進化を振り返ってきた。私にとって、パナソニック在職中にこのような歴史的な技術の大きな変化の中で研究開発の仕事が出来たことは大変恵まれたことであった。しかし、これは最初に述べるべきであったかもしれないが、偶然ではなかった。

私は大学在学中に漠然と無線通信関係の仕事がしたいと考えており、研究室もその分野の研究室を選択した。私の希望が具体的になったのは、研究室の先輩を頼って会社訪問をした時であった。それは、日本の通信技術の総本山である日本電信電話公社（現、NTT）の横須賀通信研究所を訪れた時のことである。先輩が誇らしげに体積 500 cc の TZ 802 型の携帯電話（図 2-2 右）の試作品を見せてくれた。その時は、世の中にはまだ自動車電話機しかなかったのも、その小ささに驚くとともに、これからは絶対に携帯電話の時代が来るという確信のようなものを感じた。そして、さらに驚いたのは、その試作品を作ったメーカー名を尋ねた時であった。電

電公社と共にそれを試作したのは、松下通信工業（現、パナソニックモバイルコミュニケーションズ）と言うのではないか。今でこそ、パナソニックは総合エレクトロニクスメーカーとしてその名を知られているが、当時は在阪の家電メーカーという印象が強かったのである。そのようなことがあって、私は将来、携帯電話関係の仕事がしたいと思うようになった。それならば、通信機器メーカーとして実力を持っている電電ファミリーと呼ばれる NEC か富士通を選択するのが当時としては常識的な考えであった。松下通信工業は、電電公社に携帯電話試作機を納入しているとは言え、松下グループ内ですら認知度は低い。

そのような状況であるにも関わらずパナソニックを選んだ理由は何か。ある話を思い出したからである。少し前に、アラブ産油国の王様が大金を叩いて自分の豪邸まで電話線を引き、先進国と同じように電話を使えるようにしたが、あまり使われずに宝の持ち腐れになっているということであった。その理由は簡単で、電話機を持った通話相手が国内にほとんどいなかったからである。この話を持ち出すまでもなく、通信システムは通話相手がたくさんいてこそ価値がある。携帯電話が成功するためには多くの人が使えらる状況を作り出さなければならない。少量生産の産業用機器が専門の通信機器メーカーより、家電という大量生産の民生用機器が専門のパナソニックのほうが良いのではないかと考えた。また、本当に一般消費者の方々が欲しいと思うような携帯電話機を作れるのではないかと考えた。結果的には、これが当たって日本一のシェアを取ることもできたが、社内で認知されるまでの苦労は随分と大きかった。

最後に、この携帯電話発展の歴史から科学技術のあり方として学ぶべき点であるが、理論科学は別として、技術は性能と信頼性を維持した上でコストをどれだけ低減できるかという点に集中して発揮されるべきではないかということである。

コスト低減には、技術で達成される部分と技術以外の要因で達成される部分があるため、研究目的の一部にコスト低減という項目があると、なぜか一段低く見られるところがあるように思える。しかし、そのようなことは決して無い。なぜならば、コスト低減を目標に掲げていない研究も、研究資金を必要とする限り、暗黙のうちにコスト低減が目標の一部であるからだ。研究成果は、人類が再利用できる形になって初めて成果となるので、研究に費やした費用、時間、手間を省いて、成果が再利用できるところに真の意味がある。したがって、どの研究も研究の本質はコスト低減であると言える。

以上、携帯電話の歴史に始まって技術論まで展開させて頂いたが、著者の体験談が、皆様の研究テーマ推進のための何らかのご参考になれば幸いである。特に、若い学生諸君においては社会で働く 30 有余年の間にそういう機会に巡り合うことがきっとあるのではないかと思う。その時には、この話を思い出して、しっかりと技術の潮流を読み、自ら積極的に行動をして頂ければと願うものである。

#### 参考文献

- [1] 小川晃一、石崎俊雄、小杉裕昭：「携帯電話用高周波デバイスの超小形化技術」, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.3, pp.251–257, March 1999.
- [2] [http://www.hi-ho.ne.jp/ja7gnd/Journal\\_Review1.htm](http://www.hi-ho.ne.jp/ja7gnd/Journal_Review1.htm)
- [3] G. L. Matthaei, “Comb-line bandpass filters of narrow or moderate bandwidth”, Microwave Journal, vol.6, p.82, 1963.
- [4] T. Ishizaki, M. Fujita, H. Kagata, T. Uwano and H. Miyake, “A very small dielectric planar filter for portable telephones”, IEEE Trans., Microwave Theory Tech., vol.MTT-42, No.11, pp.2017–2022 November, 1994.
- [5] T. Ishizaki, M. Fujita, H. Kagata, T. Uwano and H. Miyake, “A very small dielectric planar filter for portable telephones”, 1993 IEEE MTT–S Digest, H–1, pp.177–180, 1993.
- [6] 特許 3175421, 特許 3291846, 特許 3333317, 特許 3860478