

ミリ波開発の現状と展望

東北大学 電気通信研究所 教授

米山 務

(工学博士)

この講演録は、米山先生が1997年10月27日当社で行った講演の録音をもとに、編集事務局が原稿を作成して掲載するものです。

1 はじめに

ご紹介いただきました米山でございます。アンリツで講演させていただくのは、これで2回目になります。1回目は筑波の方でやらせていただいております。あれは、アンリツの何周年かの、特別な年だったような記憶がございます。よろしく、お願いいたします。

私の研究室といいますが、私の恩師の研究室の卒業生もいますし、それから、前から大学の方へネットワークアナライザを売りに来たり修理に来たりした方も、ここにはお見えのようで、非常にアットホームな感じがしております。

今日は「ミリ波開発の現状と展望」という話をさせていただこうかと思えます。最近いろいろ注目されていますミリ波が、現在日本ではどうなっているかという辺りを、ちょっと歴史的な経緯もふまえて、お話ししたいと思います。

2 ミリ波開発の方策と方向

イントロダクションから入りまして、ミリ波研究の歴史を円形導波管の時代まで遡ってお話しし、MMICに代表される最先端の話をします。さらに、実際ミリ波を使うためにはもう少し安くなければならない、それにはどうするか、というような話をし、終わりのほうに私のやったことをちょっと入れさせていただき、そのアプリケーションをお話しし、その後、漫談を1つ入れて、結びにさせて頂きたいと思えます。

3 21世紀における電気工学の7挑戦

「ミリ波」と最近特に盛んにいわれますが、ミリ波はどう

使われるか、あるいは、ミリ波はどう期待されているか、という話を何か資料で検証したいと思ひましてちょっと探しましたら、こういう資料がございました(表1)

表1 21世紀における電気工学の7挑戦
(IEEE New Technology Directions Committee)

1. 通信(いつでも、どこでも、だれとでも)
2. データ・アクセス(いつでも、どこでも、どんな情報でも)
3. 仮想現実
4. ITS
5. 安価なエネルギー
6. キャッシュレス社会
7. ペーパーレスオフィス

これでミリ波の位置といいますが、重要性をご理解いただければと思います。21世紀における電気工学、エレクトロニクスを含んだような電気工学に7つの挑戦があります。これはIEEEのNew Technology s Directions Committeeがまとめたものです。非常に格調の高い英文ですので、私が訳すとその格調を損なうと思ひまして、簡単にキーワードでまとめてあります。まず、通信です。これは本当の意味の「いつでも、どこでも、誰とでも」を実現するという事、これはいつも言われていることです。それからデータアクセス、この「誰とでも」のところを「どんな情報でも」に置き換えたようなことを実現したい。それから、仮想現実的に「どこへでも」、これを強いていえば、「いつでも、どこにでも」と言うべきかもしれません。それから、ITS(Intelligent Transport System)で、

交通システムのインテリジェント化，要するに高速道路での衝突防止等を含めたものです。それから，安価なエネルギーを，しかも，安全なエネルギーを供給すること。キャッシュレスの社会を実現すること。ペーパーレスのオフィスの実現。こういうものが7つのチャレンジとして挙げられています。

この中でいくつミリ波が関係しているだろうか。まず，1番目の通信，これは明らかにミリ波が関係します。特に高速の通信になって，Last Mile，最後の1マイルは無線でなければならないというふうなことが言われています。Last Mileの解決には，ミリ波がキーテクノロジーとして重要になる，といわれています。同じような意味でデータアクセスにもミリ波が関係するだろうと思います。次は，ITS，車の間の衝突防止，情報の伝達等にミリ波が重要になります。この7つの大きなターゲットのうち，少なくとも3つにミリ波が非常に深く関係しているということで，私は，ミリ波は21世紀に重要なテクノロジーになると申し上げたいわけでございます。

4 日本におけるミリ波研究開発の歴史

さて，歴史的にミリ波というのは日本でどのように発展してきたかを見てみたいと思います。日本におけるミリ波の研究というのは，昔のNTTのミリ波の長距離伝送の研究に端を発する，すなわち，これをもって，日本におけるミリ波の誕生と言っていいと思います。私自身もこの辺でちょっと関係したばかりに，その後ミリ波から抜けられなくなって，ずっとこう来ているわけです。その頃を思い出すと，八木宇田アンテナを発明なさった宇田先生のご子息の宇田宏さんが，今の通信総研にいまして，35ギガでミリ波の伝搬をやっていました。東京タワーと小金井の間で実験をやっていて，雨が降ると電波が届かないという話をしていたのを記憶しております。ですから，この空間伝搬と導波管伝搬の2つが，そのころのミリ波の研究を動かしていました。そのころの学会はすごくて，少し遅れて会場に行きますと，もう教室に入れにくいくらい，いつも超満員だったことも記憶しております。

しかし，そのミリ波の研究も1970年代にあのコーニング社の光ファイバーが現われて，それで，文字どおりある日一瞬にして研究が終わったという，朝目が醒めたら研究が終わっていたというくらい，突然にミリ波の研究がストップしたというのを，非常に強烈に覚えています。ある意味で，私は非常に勉強になる時代に生まれたなァと思います。こういったいろいろな技術が，ほとんど実用になるレベルまで達しても，

そういうふうなコンペティターが現われると一瞬にして消えてしまう。そういう判断をどうしてするのか。そういうのは実際に見なければわからないのですが，幸運にもそういう時に遭遇し，いい経験をしたと思います。その後，ミリ波の研究は今の通信総研にほとんど移って，民間の方のミリ波の研究といっても「ミリ波は金がかかってだめだ，やめよう」という話しか聞けなかったんですけども，通信総研はそれこそ通信総合，あのころは電波研究所でしたが，威信をかけてこういうミリ波の研究を続けて現在に至っています。その間，ミリ波もやや復活しましてATRとかRobotecs，MilliwaveというようなR&D会社が創立されました。たとえば，図1の左下にエポックメーカーンクなことをまとめてありますが，HEMTの発明とか，名誉あることですけどもNRDガイドの発明がここに入っています。これが，大体日本におけるミリ波の歴史です。最近，ミリ波が再びそのルネッサンスの時を迎え，また，ミリ波の研究が始まったと言えると思います。

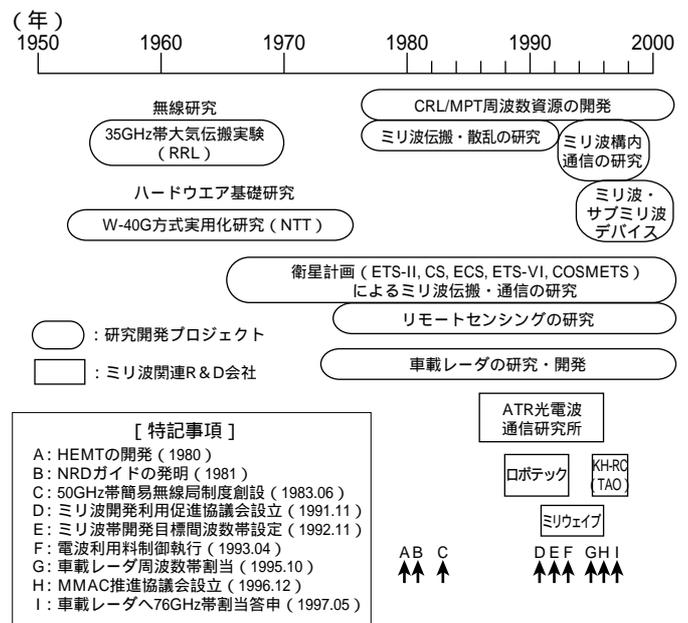


図1 日本におけるミリ波研究開発の歴史

5 各種ミリ波利用システム

この表 (表2) も，非常によく分類されていると思います。構内高速LANとか，従来有線系を使っていたものを，ミリ波で置き換えるという考えです。そのとおり，可能性が大いにあります。とにかく，構内高速LANなどは，ミリ波の一番得意とするところですよ。それから，従来，無線でやっていたものをミリ波でやる，なにしろ最近電波が混んできています

ので、それをミリ波で置き換えようとするもので、これも、そのままイエスといえることかと思えます。それから、ミリ波でなければできないといえますか、ミリ波が最も適したものとして、今申しましたようなITSがらみの車載レーダとか、電波天文などはミリ波しかないような研究です。ミリ波に最適の利用システムとしてリモートセンシングがあります。こういうふうな、大きく分けて、有線、無線、ミリ波固有のシステムでの応用が考えられます。

6 ミリ波に関する論文の動向

こういうふうなものに向かって、今、みんな研究を進めています。でも、日本の学会で、ミリ波はどのくらい数多く研究されているか、アメリカはどうか、過去6年間のデータを調べてみました(図2)。左側が日本で、右側がUSAです。日本でいいですと春と秋に学会が開催されています。その学会に、マイクロ波関連のセッションがあり、そこで発表された論文のうち何パーセントが、ミリ波に関係したものかという割合を示したものです。日本を見ますと、1992年に急に下がっており、また上がって今年(1997)は昨年と同じ程度、横滑りになっている、というような動きをしているわけです。最近、マイクロ波関係の4つの論文のうち1つはミリ波です。それぐらいミリ波が注目されています。面白いのは、1992年はバブル崩壊で、まったく日本経済を反映しています。もう一つ、このカーブが反映しているのは、どうも、半導体の設備投資と同じ動きをしているようです。私は、これを見たとき、ある会合でミリ波というのは不幸な星のもとで生まれた電波だといって笑われたことがあるのですが、実際最初は光

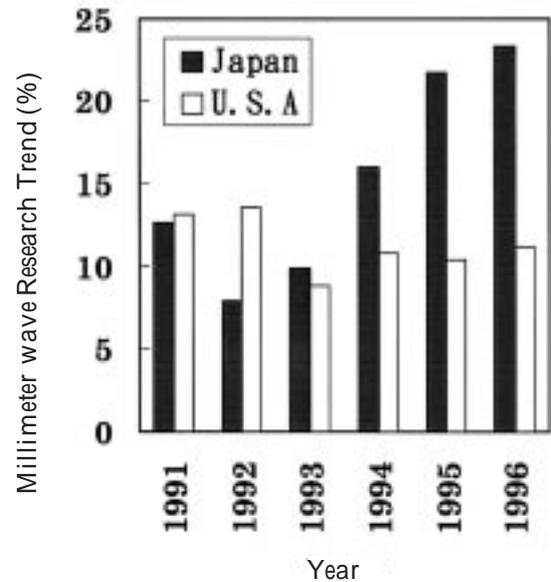


図2 ミリ波関連発表件数
MM-WAVE RELATED PAPERS/ PAPERS
IN μ-WAVE SESSIONS

ファイバの出現で痛いに会い、再び、経済の破綻で痛いに会いました。研究していて、何か経済的に不景気になると、まず最初に先端の研究に影響がくるなというのは、これで実感としてわかったわけです。

それから、右の方はアメリカなんです、これはパーセントですから絶対数はさておき、アメリカは、だいたいコンスタントに推移しています。1993年でちょっと下がって、あまり、回復しないで下がりっぱなしですが、なぜこうなるか、ここで理屈を付けますと、Dual Useという政策がアメリカで出てきました。Dual Useというのは、軍事用に開発したものを民需に使うという、大統領が言い出した考えなんです。

表2 各種ミリ波利用システム

分類	利用システム	競合技術	備考
A. 有線系をミリ波で置換	構内高速 LAN 加入者系高速無線アクセス ビデオ分配システム 移動通信基地回線	有線(光ファイバ,より対線) 光ファイバ,同軸ケーブル CATV 光ファイバ,同軸ケーブル	B-ISDN(マルチメディア)対応 同上 低・中人口密度地域,経済性 経済性
B. 他の無線系をミリ波で置換	マルチメディア移動アクセス POSシステム 列車通信 路車間通信 放送用短距離FPU IDカードシステム 衛星間通信 マイクロセル通信 ロボット制御	2GHz帯 LCX(UHF) VICS(準マイクロ波,赤外) 準ミリ波帯 2GHz帯 Sバンド,準ミリ波,光 UHF,準マイクロ波 2GHz帯	B-ISDN(マルチメディア)対応 付加価値(画像等) 同上 同上 高品質(HDTV) 超小型薄形化,経済性 大容量 高速フェージング対策 小形化,高分解能
C. ミリ波固有システム	車載レーダー 電波天文観測 リモートセンシング		小形,高分解能 星間分子 オゾン層破壊モニターなど

そうしますと、どんなことが起こるかという、今まで軍関係者が研究していたものが民間になると、これは日本でも言えることですが、民間というのは学会で発表しないものから、落ちこちているんです。いままで、軍の関係者が同じ研究をしていて、14%位のレベルだったのが、Dual Useで下がると、民間があまり学会活動をしないものですから、10%位に下がったままになっています。これは、ちょっと困ったことなんです、アメリカにはこれと平行して、MMIC固有の学会がもう1つあります。あいにくその学会について調べなかったのですが、そちらの方にも論文が出ているはずで、絶対数では非常に膨大なもので、日本に比べて多いんですが、パーセントはこんなものだと思います。ですから、日本では、ミリ波は非常に注目されているとお考え頂いていいと思います。

7 MMICについて

次に、最近一つのキーワードになっているMMICについてお話ししたいと思います。先程、R&D会社がいろいろ設立されたというお話をしましたが、そのうちの1つでMilliwaveという会社があります。その会社が開発した、MMICの60GHzの受信機の写真です(図3)。

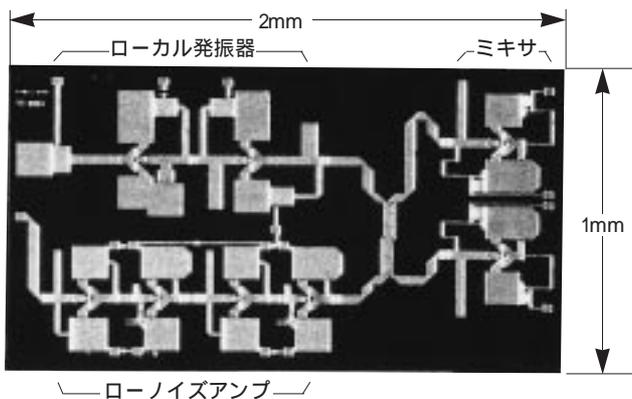


図3 60GHz帯受信機(ミリウェイブ提供)
60GHz Receiver

これは1つのウエファの上に、ローカル発振器、ローノイズアンプ、ミキサを基本にして、完全な受信機を組み立てたものです。右側がミキサ、左下がローノイズアンプ、左上が発振器のようです。こう見ると大きいと思われるかもしれませんが、実は、縦が1ミリ、横が2ミリのものなんです。このくらいの小さいものの中に、これだけのものを組み込むというのがMMIC(Millimeter-Wave Monolithic Integrated Circuit)です。

モノというのは1つ、リシックというのは石ころという意味で、どうもウエファを1つの石ころに見立てているようで、それにこういう機能をのせたというものです。これが、典型的なMMICの形で、とにかく小さい。しかし、小さいということに意味があるのか、あるいは、なぜ大切なのかという、ウエファの値段は高い、小さくすると安くなる、性能を犠牲にしても小さくしようというのがこのMMICで、小さくすると性能が上がるのではなく、むしろ性能は下がりますが、それだけ値段が安くなります。それで、この1ミリ×2ミリのようなものを作るわけです。同様に、この写真が誘電体共振器付きオッシレータです(図4)。

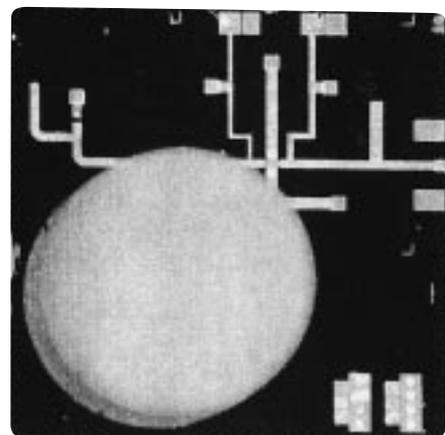


図4 60GHz帯発振器(ミリウェイブ提供)
60GHz Oscillator

聴講の皆さんの中にMilliwaveの方がいらっしゃる方で、ちょっと悪口をいわせていただくと、今申しましたように貴重なウエファの上に、これだけの広い面積をとったというのは、金の無駄遣いになっていると思います。これは、あまりうまく方法ではないんですが、周波数の安定とということでは腹は代えられなくて、こういうものを使って周波数を安定させているということです。ついでに、後でも出てくると思いますが、半導体のウエファというのは本質的にはアクティブなものなんです。ところが、見ておわかりのようにほとんどパッシブな線路に使われているわけです。これは非常に下手なことなんです。できれば、100%アクティブに使いたい。しかし、現実にはアクティブとして使っているのは20%だそうです。80%はパッシブになってしまう。これを逆転するぐらい、アクティブに80%ぐらい、パッシブに20%ぐらいにならないと、実はMMICが成功したとは言えないわけです。なぜその半導体のウエファにこういうものをのつけるかということ、ほとんどアクティブに使うということを前提に

しているからで、もしパッシブに使うのであったら半導体のウエファではなくて、たとえば、アルミナの板でも結構なわけです。そういった意味で、まだまだ、20%しかアクティブに使えないというのはMMICが成熟していないということなのです。

7.1 High Power Amplifiers

ところで、先ほど申しましたようにMMICというのは、あらゆるデバイスを作るというわけではなくて、先程のレーザではローカルオシレータ、ローノイズアンプ、ミキサ、また、トランスミッターであったらハイパワーアンプ、そういうような基本的なデバイスが大切です。そういうデバイスを、今、日本でどういう会社がどの程度のことをやっているか、これも学会から拾い出してご参考までにテーブル(表3、表4、表5)にしたものですが、三菱、東芝、NEC、日立、それから先程申しましたMilliwaveは、実はNECと富士通の合体で、送信機はNECで、受信機は富士通でといったように、このMilliwaveというのはその場合場合で形を変えています。相手を変えるというんでしょうか。

(表3を参照して)三菱のハイパワーアンプリファイヤは、HEMTを使って、そのゲート幅を最適化して60GHzで23dBmぐらいの出力が得られています。

東芝のものは、42GHzと周波数がちょっと下がっています。ほぼ、30dBm、1Wのパワーが得られるというアンプなんで、

表3 HIGH POWER AMPLIFIERS

COMPANIES	PERFORMANCES	REMARKS
MITSUBISHI	Gain 4.7dB P _o 23.0dBm @ 60GHz	AlGaAs/InGaAs PHEMT with Optimized Gate Width
TOSHIBA	Gain 42.6dB P _o 29.0dBm @ 41.5-42.0GHz	4-stage Pre-Amp. /4-stage Post-Amp.
NEC	Gain > 20dB @ 48-60GHz	AlGaAs/InGaAs HJFEMT 3-stage Amp.
	Gain 7.0dB @ 94GHz	AlGaAs/InGaAs HBT
HITACHI	Gain 13dB @ 60GHz	GaAs PHET 3-stage Amp.
	Gain 16dB @ 77GHz	AlGaAs/InGaAs /GaAs 3-stage Amp.
MILLI WAVE/NEC	Gain 14dB P _o 17.1dBm @ 60GHz	AlGaAs/InGaAs HJFET 2-stage Amp.
	Gain 9.1dB P _o 16.8dBm @ 60GHz	30/60GHz Doubler 2-stage Amp.

表4 LOW NOISE AMPLIFIERS

COMPANIES	PERFORMANCES	REMARKS
MITSUBISHI	Gain 8.1dB NF 1.8dB @ 50GHz	AlGaAs/InGaAs PHEMT
	Gain 42.2dB NF 3.0dB @ 51GHz	PHEMT 4-stage Amp. in Hermetically Sealed Package
TOSHIBA	Gain 7.6dB NF 0.9dB @ 57GHz	InAlAs/InGaAs PHEMT
	Gain 12.0dB NF 5.6dB Using MS @ W-band Gain 10.0dB NF 7.0dB Using CPW @ W-band	AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT 3-stage Amp.
NEC	Gain 11.5dB NF 3.0dB @ 59GHz	AlGaAs/InGaAs HJFET 2-stage Amp
	Gain 17.2 ~ 18.3dB NF 3.2 ~ 3.7dB @ 58 ~ 62GHz	HJFET 3-stage Amp with Single Bias Supply

表5 MIXERS

COMPANIES	PERFORMANCES	REMARKS
SHARP	Lc 9dB @ 60GHz	InGaP/GaAs HBT Single Mixer
MITSUBISHI	Lc < 16dB @ 54 ~ 60GHz	Image Rejection Harmonic Mixer
	Lc 8.4-12.5dB P _{LO} - 2 ~ 0dBm @ 55 ~ 60GHz	InP HEMT Low Local Power Resistive Mixer
NTT	Lc 6 ± 1dB P _o 29.0dBm P _{LO} - 7dBm @ 55 ~ 66GHz	PHEMT Uniplanar 4-stage Post-Amp. Resistive Mixer RF Amp., LO Amp., Mixer on Chip
NEC	Lc 7.7dB @ 40GHz P _{LO} 10dBm @ 10GHz	Subharmonically Pumping Mixer with Multiplier
MILLI WAVE/FUJITSU	Gc > 20dB NF < 3.6dB P _{LO} 5dBm @ 59-61GHz	InGaP/InGaAs HEMT Mixer with 4-stage LNA

4ステージのプリアンプと4ステージのポストアンプで構成されています。これは、今度のオリンピックで使うものなんです。これは、フィールドピックアップというもので、スケートとかスキーの選手と一緒にテレビカメラを動かして、リアルな映像を送るものです。これを選手と一緒にぐるぐるぐるーっと、たとえば、スケートリンクの上を動かして放送するのがそうです。その時に使うものだそうで、こういうような性能の1Wぐらいのパワーが出るものが出ています。

NECでは94 GHzにチャレンジしているというところを評価したわけです。しかも、普通はHEMTを使うんです。HEMTというのはマチュアーなんです、HBT (Hetero-Junction Bipolar Transistor) を使って94 GHzにチャレンジしています。

日立の77GHzについては、後ほど車載レーダのところでもお話しますが、衝突防止レーダなど小電力レーダに許された周波数が76GHzになったことによるものです。日本では今まで、60GHzが主流でしたが、これでは外国相手に商売ができないということで、70GHz帯にしようとするものです。これであれば、ヨーロッパ、アメリカにも売り込める、それをいち早く日立がやっているわけです。

Milliwaveですが、これの変わっている点は、入力は30 GHzですが、ダブラーを使って60 GHzにし、それをアンプしてこういう性能を得ているところにあります。ダブラーを使い、ちょっと変わっているということで、ここに載せたわけです。いずれにしても、こういうふうなことで、各社それぞれやっているということをご理解いただければ、よろしいかと思えます。

7.2 Low Noise Amplifiers

次に、アンプのうちのローノイズアンプについてお話します。受信機用にこういうようなのがあります(表4)。

三菱のものはノイズフィギュア1.8 dBで、三菱は世界一だと発表しました。それから、半年後、三菱がたしか春の学会で発表して、秋の学会で東芝が0.9 dBのノイズフィギュアを発表しました。相手がなんと言うだろうかと思ってこの2つを並べたら、なんとも言わないんです。どちらもトップデータで、ステート・オブ・ザ・アーツのデータで、今すぐに実用になるというものではないから、彼等に言わせると、ま、そういうんだったらそうですかという程度のことらしいんです。実際使えるのは、やはりもう少し大きい3 dBです。これは研究室で注意深く作ってできた値で、他へ持っていくともうこれ、ダメかも知れないというふうな、値だそうで、私も相手を皮肉ってやろうと思ったら、そういう勉強をさせられました。測定器の会社の方だとよくご存じと思うのですが、このようなノイズフィギュアを実際に測定できるんですか、というような話をしたら、三菱の方は誤差の範囲じゃないかと言っていました。誤差と言うのは測定器の誤差ではなくて、環境の方の誤差で変わるのではないかというようなことを言っていました。

表4の東芝の下側ですが、これがちょっと面白い。両方ともW - バンドですが、マイクロストリップ線路とコプレーナ線路とでは性能が違うと言うんです。マイクロストリップの方が性能がよいというデータがあります。ゲインもコプレーナを使うと10dB位で、マイクロストリップを使うと12dB位だということです。実は、後の話では、コプレーナを使う方がよいということになるんですが、ある別の理由により、理由ははっきりしていますが、こういうことになります。

7.3 Mixers

(表5を参照して)ミキサについては、いくつかある中の特徴のあるものをお話します。NECのものは、バイアス電源が1つだということ売り物にしています。

NTTのものは、ユニプレーナを採用しています。ユニプレーナというのは、要するにウエファの上だけを使う、という意味で、先程言いましたコプレーナウエーブガイドなどがこれに入ります。それで、ミキサ、RFアンプ、ローカルアンプなどを全部入れて、ワンチップ化したものなんです。これの特徴は、本当かと思うぐらい、ローカルのパワーが - 7 dBmと少ないんです。他のところ、たとえば、少ないと言われる三菱でも - 2 dBm位なんです。それに対してこれは本当に少ない。それから、バンドが10 GHz以上をカバーしており、コンバージョンロスについては、他が9 dBとか、16 dB以下というようなときに、6 dBになっています。アンプ、ミキサ、ローカルオシレータをワンチップの中に全部入れると言う、理想的な形でMMICを実現するということになります。この中で、特筆すべきものはこれかと思えます。しかし、マイクロ波ではともかくミリ波ではこれがすぐ市販されるというのは、これはとんでもない話で、これがなかなかできない。物凄いくらい数を作って1つ当たったというような感じです。

7.4 Advantages and Challenges of MMICs

さて、MMICのメリット/デメリットをお話ししましょう。メリットをAdvantageとするのはいいとして、デメリットとは言わずChallengeというんです。いかにもアメリカらしい発想です、これは要するに日本語でいうと「欠点」なんです。MMICのアドバンテージの中に、ローコストだということをやっているんですが、このチャレンジの方にはExpensive facilities requiredとあります。これが矛盾するところで、ローコストのためには非常に高価な装置がいる。しかも、これを実現するためにはいろんなことをやらなければならないということです。アドバンテージだけを見ると、信頼性が高いと

表6 Advantages and Challenges of MMICs

Advantages	Challenges
<ul style="list-style-type: none"> • Low cost • High Reliability • Low and controllable parasitics Broadband capability Reproducible performance • Multifunction capability Eliminate interconnect and buffer • High volume batch process 	<ul style="list-style-type: none"> • Expensive facilities required • Hard to trouble-shoot • Relatively low Q and high dielectric loss • Long development cycle • Retrofitting to existing systems to gain wide acceptance

か、浮遊容量と浮遊インダクタンスが少ない、1つの石ころの上にいるんなものをのっけて多機能である、それから、大量生産である、こういうことがメリットといわれていますが、正直言って、このアドバンテージで現在実現されているものはなに1つないんです。この中の1つないしは2つが実現されていると、おそらく、もう少し商業的なステージに現れているのではないかと思います、非常に難しい。なぜかという、まず、装置がどうしても大掛かりになって高い。もう1つはMMICというのは、トラブルシューティングができない、というよりトラブルシューティングをすべきものではないのです。トラブルシューティングするぐらいなら捨てた方がいい。こんなことで金をかけていたら、High volume batch processにも反するし、Low costにも反する。それから、もう1つは、性能が比較的悪いんです。MMICというのは、最先端の技術と云うことになっていますので、皆さん高性能だろと思うんですが、とんでもない話で、性能はかなり悪いんです。まず、Qが非常に低い。それからロスが多い。こういうことで性能は必ずしも良くない。それから、開発するのに非常に時間がかかる。要するにソフトとかハードにしても、なかなか、オプティマイズが難しく時間がかかる。こういうのも、1つのチャレンジ。それから、いままであるものと、どう置き換えていくか、大量にそういうことをしなければならぬということ、必ずしもスムーズにはいかぬ。こういうふうなチャレンジがずらーと出てきて、必ずしも、このMMIC、今のままではバラ色ではないといわれているし、実際そうだと思います。

7.5 Cost Reduction Techniques

そこで、どうするかと言うことです。このあいだもアメリカで実感したことです、ローコストといいながら、実際金がかかっている。こういうことを解決するために、どうする

かということが、やっと、みなさんから注目されることになってきました。

実は、私も、このままではMMICは成功しないだろう、ということはかなり前から言っているんです。それは単に米山は、MMIC嫌いだということぐらいで通っていて、だれもあまり真剣に考えてくれなかったようです。自分のやっていることが一番いいと言っている、と思っているらしいんです。そうではなくて、(価格が)高いと言うことを私は言っていたんです。このコスト・リダクション・テクニックが注目され出して、ほら、私が言ったとおりだろうと、今、やっと皆の前でいばれるようになったんです。要するに、なんとかして、今言ったようにMMICを安くしなければならぬと思っています。

表7 COST REDUCTION TECHNIQUES

Uniplanar MMICs (SPW/Slotline)
NTT Wireless Systems Labpratonics
Flip-Chip ICs Using MBB* and BCB**
Matsushita Group
Multilayer MMICs/Masterslice Technique
NTT Wireless Systems Labpratonics
ATR Optical/Radio Com munications
Research Laboratories
SANYO Electric Co., Ltd.
Multichip Modules (MCMs)
* Micro Bump Bonding
** Benzocyclobutene
BCB Loss 0.5db/ , r 2.7
SiO2 Loss 1.6db/ , r 4

それには、これから1つ1つ説明しますが、いろんな手があります。これ(表7)は、日本で提案されたものを挙げたものなんです。ユニプレーナMMICは、コプレーナウエーブガイドとスロットライン全部が、ウエファの1つの面だけでできるというテクニックなんです。マイクロストリップは、上と下を使います。それに対して、コプレーナとかスロットラインは上だけでよい。こういうのが非常に安くつく。それから、私はこれはなかなかの傑作だと思いますけれど、松下がフリップチップのICで、ちょっと変わった、ハンダを使わない方法を開発した。それから、NTTですが、多層構造のMMIC化、3次元のMMICを提案した。それから、これはどこというわけではないんですが、最近マルチチップモジュール化というのがはやっていて、その研究は非常に有望だと言われてい

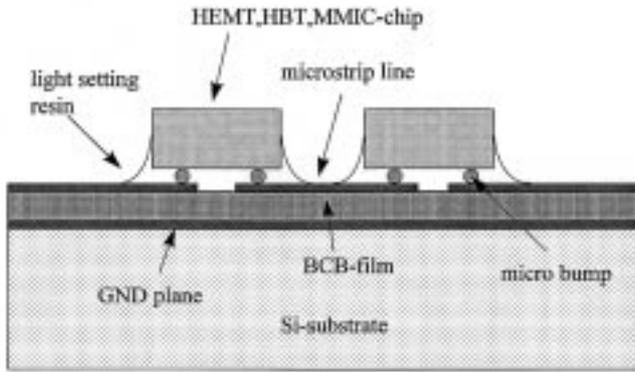


図6 マイクロバンプボンディング技術
Micro Bump Bonding Technique

チップと伝送線路との間にゴールドのマイクロバンプという小さな粒を置くわけです。熱を加えない代わりに、ライトセッティングレジンを、すなわち、紫外線を与えると硬化して収縮するようなレジンをここに置くわけです。そうして、これに光を当てると、今言ったようにレジンが堅くなってぎゅっと縮んで、マイクロバンプが平らになるぐらいの力で接着してしまうんです。これでやりますと熱が全く必要ない、だから熱的な破壊が起きない。しかも、もう1つ彼等が良いと言ったのは、これが故障したときに溶剤を流し込むだけで取り外してまた使える。熱を全く使わない接続の方法を確立したということです。私は、これは非常におもしろい提案だと思っていて、APMCというマイクロ波のアジア地区の国際会議の招待講演として推薦しました。

図6は、従来の方法とほぼ同じ、横にチップを接続したものです。ところが、安くあげるために、次のような案もあるんです。実際、安く上がるんだそうです。

図7はスタックICと言われるもので、チップを縦に積み重ねるものです。間にバンプを置いて、熱で接続するもので、基本的には松下の方法とは異なっています。このように、チ

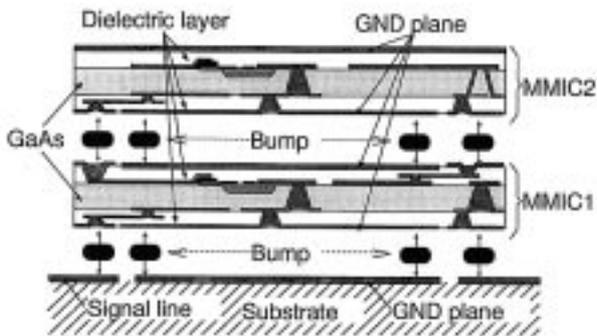


図7 スタックIC型 MMC (NTT 提供)
Stacked IC Concept

ップを横に並べるだけではなく、縦に並べると場所をとらないという考えです。この「スタックIC」というのはNTTが言い出した言葉なんです。一種の3次元化です。

7.8 Master Array with MMIC

図8はマスターアレーといって、NTTが言い出して今盛んに売り出し中のもので、LSIの分野ではよくやられているものです。図の下側に示すように、必要なものをこの部分にいっぱい作っておく。そして、それを全部使うわけではなく、先程言いましたように、ウエファにはアクティブなものだけを作る。パッシブなものは、アクティブな部分の上側の層に作るわけです。それはPolyimideのような安いもので作り、伝送線路をそこに置くが、そこには半導体デバイスを作らない。アレイユニットには、アクティブなトランジスタや抵抗なども入っていますが、そういうトランジスタのようなものは下側の層に作る。必要なものをこういうふうにして、足を伸ばして選びだして使う方法です。貴重な半導体ウエファをパッシブなものには使わないという発想です。NTTは、これによって非常に安くなると言っています。

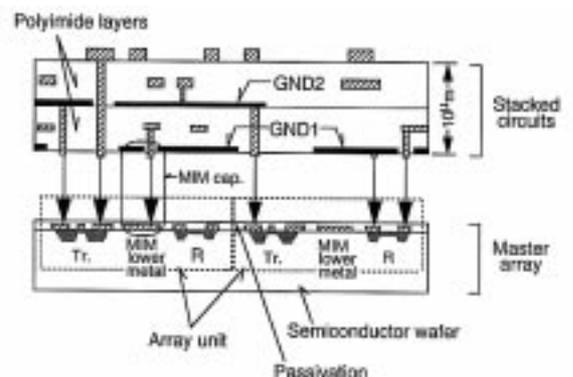


図8 マスターアレー型 MMIC (NTT 提供)
Masterslice 3D-MMIC Concept

次に、製作工程についてお話しします。3層構造になっており、Master Array 層には先ほど言ったトランジスタとか、必要なものをアレー状に一杯作っておくわけです。図9の中央部は、Device Selection 層で、マスターアレーのうち必要な所だけを取り出すための一種のマスクです。ここにはパッシブな線路を置く。この層に設けた穴を通してデバイスセレクションをすることで、この3つを組み合わせるとシングルチップレーサーができるわけです。なぜ、シングルチップかかというと、シングル、すなわち、たった1つのウエファの上に、すべてが作られているからです。

私は、次のような質問をしたことがあります。Array Unitを

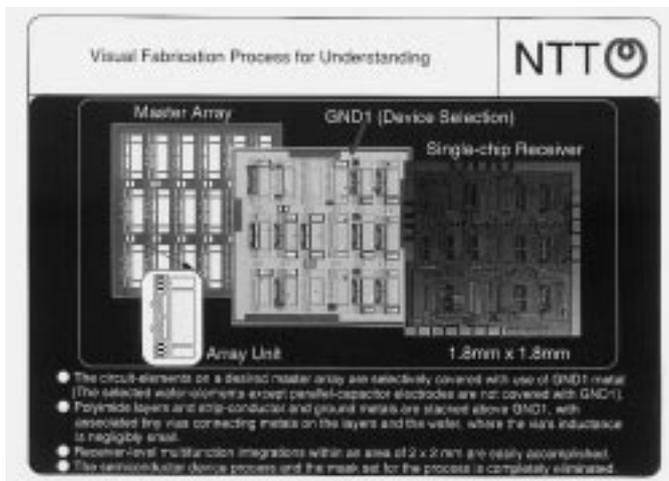


図9 マスターアレーのデバイス選択層 (NTT 提供)

たくさん作っても、全部使わないもったいない。たとえば、この中の1個だけしか使わないような場合は非常に不経済ではないかと。

彼らは次のように答えてくれました。そういうことはない。そういう、たった1つの機能のためにこういうことはしない。たとえば、レーザーのような多機能なものに使うと、80%ぐらい使い切る。ですから、非常に安くなり、経済的に成り立つ。

このようなことから、これを今NTTが盛んに売り出しています。海外も含めて宣伝しています。そういうふうにして安くあげる方法がいろいろあります。

8 NRD Guideについて

ここで私のやったものを少しお話しします。(図10を参照して)これがNRDガイドです。皆さん、金属というのは電気を良く通すものだと思いでしょが、ミリ波のように周波数が高くなると、これは決してそうではないんです。周波数が高くなってくると、金属というものはだんだん電気を通さ

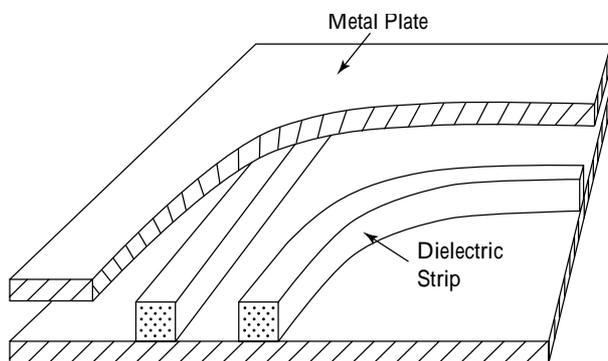


図10 NRDガイドの構造
Structure of NRD-Guide

なくなってくる。通し方が悪くなっていく。ロスが増えてくる。これは必ずしも良い例えではないんですが、光ファイバーで扱うような周波数になると、金属というのは全く機能しないんです。光ファイバーはガラス、誘電体(dielectric)です。そのような周波数になると誘電体がいい。それほど極端ではないが、ミリ波はやはりダイエレクトリックがいい。たとえば、マイクロストリップで線路を作ると、1メートル当たりで換算しますと、だいたい60 dBぐらいの損失がある。マイクロストリップは60 GHzでいいますと60 dB/mという損失がある。ところが、誘電体で線路を作ると、3 dB/mぐらいなんです。話にならないんですね。デシベルで20倍なんですけれども、20倍と言ったら大変な数なんですよね。100万分の1になるんです。3 dBというのはわずか2分の1なんです。ですから誘電体を使った方が圧倒的にいいわけです。ところが、誘電体で線路を作ると、たとえば、図10の右側のように曲げるとミリ波が、線路の延長線方向に逃げていってしまう。だから、本質的に低損失なんです。放射があって結局損失が大きくなって使えない。もし、放射が全くないような誘電体線路があたり、これは理想的な線路ができると言われていたんです。

それで、1つ考えてみようかと、いや、考えたわけではないんです。偶然に、全くの幸運で思い付いたものなんです。今になって思うと、こう考えればわかりやすいんだということです。電波をまったく通さない空間の中に誘電体線路を入れたら良いだろう、という発想なんです。そうすると、線路がまっすぐな場合はもちろん、曲げても、電波が存在し得ない空間だったら、電波は逃げないだろうという発想なんです。電波が全く存在し得ない空間って、そもそも世の中にあるかということですが、これ、意外に簡単にあるんです。導波管をカットオフにすればよいわけです。たとえば、図10のような構造で、上下のMetal Plateの間隔を半波長以下にすると、導波管というのはカットオフになって、電波がまったく存在しないんです。そこへ、誘電体線路を入れると、電波は線路に沿って伝わっていくわけです。普通なら、電波は線路の延長線方向へ進むんですが、そこはカットオフで電波がまったく存在し得ない空間なので、電波は曲がった線路に沿って伝わっていくことになるわけです。というふうなことを考えて、これは放射のない線路だということで、非放射線性線路、あるいは、Non-Radiative Dielectric Waveguideという名前を付けて放っておいたら、研究室の学生がNRDという名前にしてくれて、今に至っているわけです。こういうわけで、これは誘電体線

路でも放射が全く発生しないから、曲げてもどんなことをしても大丈夫だと言うので、いろいろな回路ができるわけです。

NRDで作った送受信機装置の一例をご紹介します(図11)。Cが送信機で、Dが受信機です。こういう格好でNRDを使った送受信機が市販品になったんです。通信総研で買ってきて、私が売ったのではないですよ、ある会社が作って通信総研に売ったものです。後でお見せしますが、通信総研がこれを使って実験しました。これの性能は、60 GHzで、400 Mbit/sまでは全く支障なく働く。それ以上は、自分のところにある測定器で測れないんです。おそらく、600 Mbit/sも超えるだろうし、それ以上だろうと思うんですが、測定器がなくて測れない。測ることができた範囲では、400 Mbit/sまではパーフェクトだった。見ていただきたいのは、図11のEが、同じ周波数(60 GHz)のミリ波の方向性結合器です。それに比べても十分小さい寸法だと思います。ちなみに、この方向性結合器(E)と同じ機能の部品は、AとBに2つあるんです。ほんとに、ポイントなんです。そういうわけで、NRDガイドというのは、実用に非常に近いところにあります。

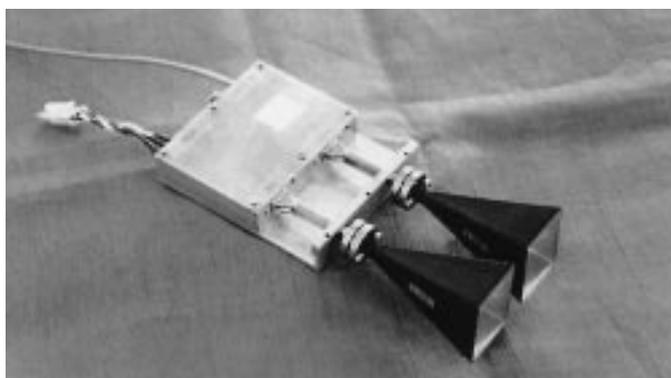
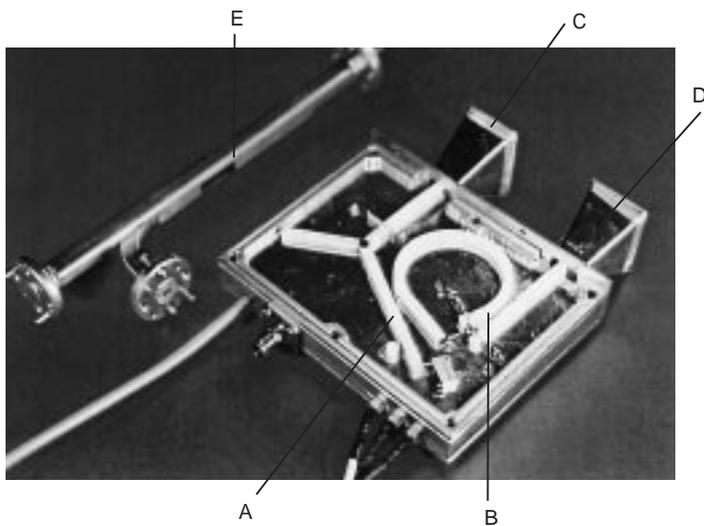


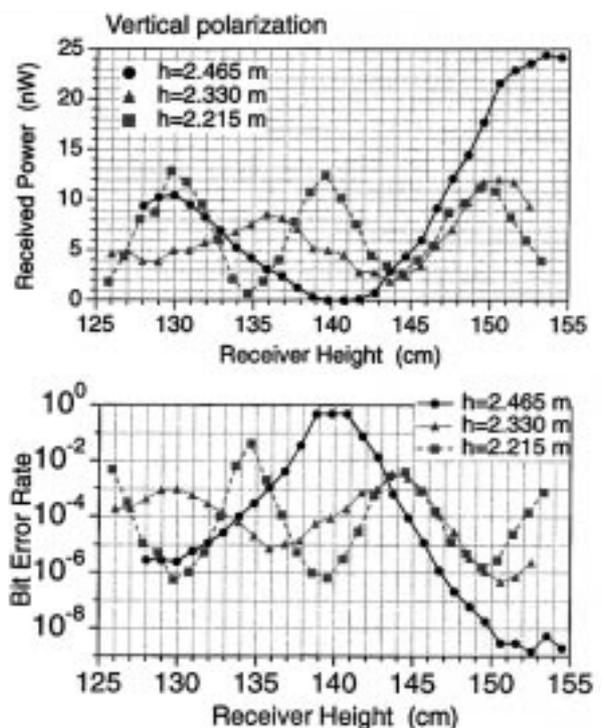
図11 NRDガイドを用いた60GHz帯送受信装置

先ほど通信総研が買ったといったんですが、図12は通信総研でNRDガイドの送受信機の実験しているところです。図13に実験結果を示します。

おもしろいことに、部屋の中の実験では受信機の高さを変えていくと、電波の強さも変わるんです。非常に当たり前のことなんですが、電波の強いところは誤り率が少なくなります。送信機が大体2.5メートルぐらいの位置にあって、それより低いところで受信機の高さを変えると、やはり高くなるほど電界強度が強い。そうすると、誤り率がずっと下がってくる。



図12 ミリ波高速無線LAN実験風景(通信総研提供)



Height dependence of received power and bit error rate.
h is the height of the transmitter

図13 ミリ波高速無線LAN実験データ(通信総研提供)

普通、誤り率が10のマイナス6乗もあればいいと言われており、10のマイナス8乗ぐらいになるとエラーフリーなどと言いますので、ミリ波の通信がこれで十分できることとなります。これは100 Mbit/sの伝送実験なんだそうですが、それぐらいの高速でもエラーフリーになるということです。

図14はNRDガイドで作ったレーダーです。厚さ1センチですが、アンテナとレーダーが全部組み込まれていて、ナンバープレートより小さい。それから、車の前のナンバープレートというのは、法律的に大したことはないので、将来これをプラスチックにしてもらい、レーダーの上に番号を書けば、ナンバープレートとレーダーを兼ねたようなのができるだろうと思っているんです。これはやはり、NRDガイドだからこぞできるものだと思っています。

そう言ってしまうと非常に不親切なので、ちょっと種明かしをしておきます。どうしてこういう薄いアンテナとレーダーができるのかというと、実は、これは2重になっているんです。図15で、上の5ミリのところがアンテナになっていて、下の5ミリのところに回路が入っているんです。図15(a)の左端にスリットが空いていて、ここが3 dBカップラーになっているんです。伝送工学を勉強するとすぐにわかるのですが、

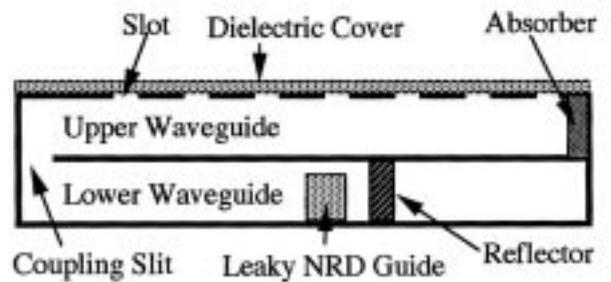


図14 NRDガイドを用いた平面型車載レーダー

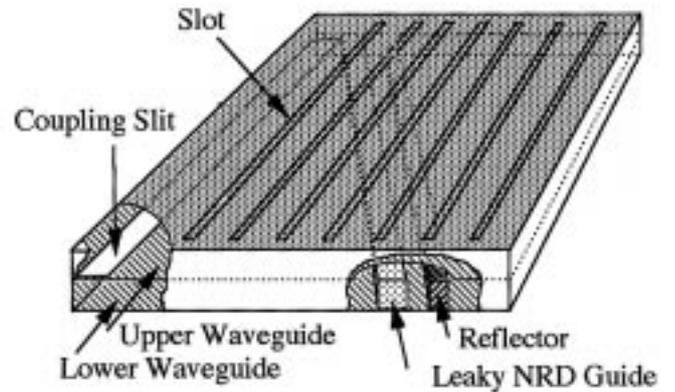


3 dBカップラーをショートすると、完全にこう電波が透過するんですね。この中にレーダーを組み込んで、ある種のLeaky NRDガイドというアンテナで、Slot Arrayから電波を出す。カップラーを通して100%エネルギーが移動して、Slotから放射するというわけです。厚さ1センチと言ったんですが、1センチの中はどのように別れていまして、上がアンテナ、下がレーダーの回路が入っているということです。

それから、これは私のところではないんですが、マークがありますからおわかりだと思いますけれど、村田製作所が、やはりNRDガイドで作ったレーダーです(図16)。



(a) Cross-Sectional View



(b) Whole Structure

図15 平面型車載レーダーの構造

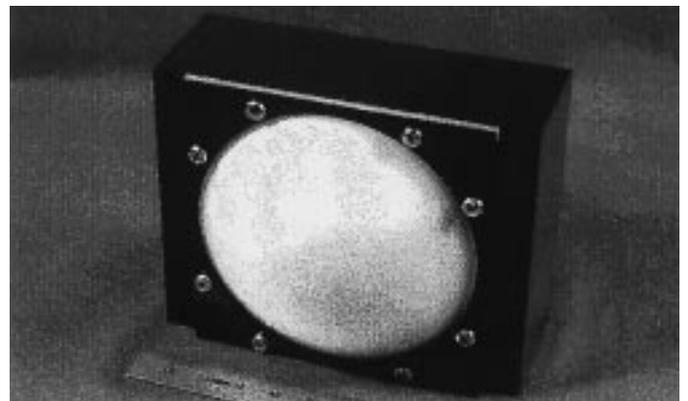


図16 レンズ付車載レーダー(村田製作所提供)

この中に必要なものが全部入っている。1辺が10センチぐらいで、中央の円形の部分がセラミックのレンズアンテナで、直径が6センチです。最近はこの6センチの中に回路も入るようになったと言っています。これはいつでも売り出せる態勢にあって、ずいぶん長年、テストしてはいたけれども、立派に働くとのことでした。

9 最近思うこと

最後に雑談を1つ。最近、定年が近くなってきましたと、自分の今までやってきたことをいろいろ考えて、いろいろ思うところがあるんです。それで、研究室にお客さんがいらっしやると、ときどき、こういうことを話しております。今日もまた、それを繰り返して話をしたいと思います。(表8を参照して) どれから話をしたらよいかわかりませんが、一時、今でもそうでしょうけれど、産業の空洞化といわれました。これは生産拠点を海外に移すということで、かなり前に盛んに言われたことです。経済的にはこれは非常にいいんでしょうけれども、これを研究の面に持ってきたらどういうことになるかということ、だんだん独創的な発想から遠ざかっていくような気がするんです。せめて研究者だけでも、実際に物を作る技術、あるいは開発のプロセスを目の当たりにしないと、なかなか独創的な考えが浮かんでこないんじゃないか。生産まで全部やれといっているわけではなくて、研究者がやらないと、産業だけじゃなくて、今に技術も空洞化して、それが行き着く先は頭脳まで空洞化してしまうんじゃないか。

次に、研究というものについてですが、私は他の人が言うことをそのとおりだと言うことはめったにないんですが、これだけはそのとおりだと思っていることがあります。それは西澤先生がおっしゃっていた、「研究は独創性が大切、それから、誰がやっても同じ結果が出なくては研究とは言えない。」、これをそのまま学生にいつも言っているわけです。

それから、同じくらい大切なことは迅速性が必要だと言っています。それで、私が研究室を任されたとき、アンリツからいろんな測定器を購入すればよかったのですが、それよ

り先にやったことは、フライス盤とか、その類いのいろいろな工作機械を買って、4階にある私の研究室までそれを運び上げたことが、研究室を作ったときに最初にやったことです。それはなぜかということ、迅速性を絶対に無視してはいかんと考えたからで、うちの研究室は外注はまったくしません。どんなものでも、全部作る。これを立前にして、もし作れなかったらどうするか、それは技術を改良すれば良い。作れるような技術でなければ、とても世の中の役に立たないから、ちゃんと考えて作れるようにしなさいと、学生にはいつも言っている。それで、最後に判断に迷ったら、今考えていることは、町工場で、要するにガレージワークショップ、ガレージラボラトリーで作れるかということ判断基準にしなさいと、いつも言っている。ですから、うちでは外注はしないし、物を作るときは、いつも自分で作れということをいっているわけです。研究室では物を作りながらヒントを得ることが大切だと思っています。

先程、工場を見学させていただいた中でおもしろいと思ったのは、重さの制御をきちっとやるのに1/3ずつ分けて重さを計り、それをプラスマイナスゼロになるように足しあわせるという考え(組み合わせ計量機)なんかは、私、大学に帰ったらぜひ学生に話をしたいと思っています。電気にまったく関係ないんですが、そういうことは、電気に大いに利用できる。そういうものは、実際に必要になってはじめて考えるので、研究室が全部外注していたら頭脳がすたれてくる、というのが私の考えです。実は、うちの研究室ではミリ波の研究やっています、といっていますがほとんど金がかからない。たとえば、学生が来ましてね、「お前、何を研究したいか?」と尋ねると、最近の学生はできるかできないかは別として、非常に高級なことを言うんです。ミリ波のホログラフィをやりたいと。「あー、いいよ、やれ。」と、いつも言うんです。普通のところだと、500万円位の測定器、送受信機を買わなきゃいかんだろう、大変だろうと思うんですが、私の所は簡単です。やるものは全部自分で作れと言うわけです。送信機も受信機もホログラフィをやるための送受信機は、全部学生が2ヶ月ぐらいで自分で作って自分で実験する。それは迅速性と、それから現場でそれを見て、自分で作ると必ず独創性が刺激されてくるということ、この2つが同時に満たされる。私は、研究室に工作機械を最初に設備して、空洞化だけは研究室では絶対排除したいという願いを実現させた。

それから、手代木(当時通信総研、現当社副技師長)さん

表8 最近思うこと

空洞化産業, 技術, 頭脳
研究独創性, 再現性, 迅速性
実験新しい発見
理論体系づけ

と一緒にテニスなんかをやっていた頃は、私はどちらかというと、理論派だったんじゃないかと思うんです。計算はかなり達人だったんですが、実験というのはあまり好きでもなかったし、あんまりやらなかった。しかし、理論だけやっていると、新しいものが出てこない。そうはいても、例えば、湯川秀樹のような、中間子理論のような理論的予測もありますけれど、そういうのはレアケースで、特に工学では新しい発見、要するに考えていたんじゃないようなことは実験をやってはじめて出てくるんだということです。

それも先程お話しした、工作機械を一番先に入れたということと結びつくんですけれども、この、実験を重視するということを35才位からですかね、40ちょっと前から言い出して、理論は実験が終わってからやる、体系付けのためにやる、というふうに、突如、方針を変えたわけです。そういうことから、NRDガイドは理論的ににも考えたわけじゃないんですが、ある日突然、あ、そうかという発見だったわけです。あれはおそらく理論だけやってたら出てこなかったんじゃないかと、今この方向転換は正しかったと思います。要するに、ここでなんだかんだ言いましたけれども、常に物を身近において独創性と迅速性をいつも磨いておくと、そのうちいいことがあるよ、ということをお願いしたいわけです。それと、もう一つは、先程ちょっと触れましたが、私は、村田製作所の人たちはよく学会なんかで話してますけど、あの会社ほどうまく学会を利用している会社、ちょっとないんじゃないかと思うんです。先程、手代木さんから、私がIEEEのDistinguished Lecturerになったと言われたんですが、日本には1人が2人でほとんどいないんですね。私がやめたあと、この村田製作所で前に専務をやっていたらっしゃった脇野さんが、後を継いだんです。会社の人、特に日本の会社の人、そういうことを継ぐというのは、本当に珍しいことです。彼は、日本の学会はもとより、アメリカの学会も毎回欠かさず出られます。村田という会社の体質もそうかも知れませんが、学会の価値と言うのを村田を通して私は再評価、というか、なくてはならないものと思っています。

それで、よく、私もこう考えるんです。今や、私は一応、ミリ波の専門家だと。これはかなり自信がある。たとえば、「お前明日から半導体をやれ」と言われたらどうするかと。おそらく、やれると思うんです。それなりの勉強の期間を与てもらえと、やれると思うんです。しかし、専門家にはなれないと思う。専門家というのは何かというと、問題を見つ

けて解決する能力があつてはじめて専門家なんです。ただ、教えられたことをやるんだったらおそらく、1年も勉強すれば半導体をやれると思うんです。しかし、そこから問題を見つけて解決すると言うことは、やはり、今後10年なりそれなりの歳月が必要ではないかと。それで、こういう判断をするわけです。何が問題で、これが解決したのか、しないのかと、こういう判断を仰ぐ場所と言うのはやはり学会じゃないかと思っています。村田がああいうふうになったのは、やはり、彼等は徹底的に学会を利用してたんだと、今、思っているところなんです。そういうことで、表8に、もう一つ、こういうことから学会なんて書けばよかったんですけれども、どれから話しても1つの話になるようなトピックで、その時々、いらっしゃった人に合わせて、話す順序を変えて話しているというわけです。

10 結論

こういうことで私の話はだいぶ端折りましたけれど、結論はこれはもう、言わない。こういうことを結論にして終わりにしたいと思います。



講演者紹介

米山 務（よねやまつかさ）

- 1959年：東北大学工学部通信工学科卒業
- 1964年：同大学大学院博士課程終了、工学博士
- 1964年：東北大学工学部助手
- 1965年：東北大学電気通信研究所助教授
電子情報通信学会論文賞受賞
- 1981年：IEEEにNRDガイド(非放射型誘電体線路)を発表
- 1984年：琉球大学工学部教授
電子情報通信学会著述賞受賞
- 1986年：東北大学電気通信研究所教授(現在)
- 1990年：電子情報通信学会マイクロ波研究専門委員会委員長
IEEE Fellow
- 1991年：IEEE MTT-S Tokyo Chapter Chairman
- 1993年：電子情報通信学会評議員
IEEE MTT-S Distinguished Lecturer
電子情報通信学会稲田賞受賞
- 1994年：日本学術会議電波科学研究連絡委員会委員
郵政省通信総合研究所客員研究官(現在)
- 1995年：電子情報通信学会東北支部長
志田林三郎賞受賞
- 1996年：電子情報通信学会業績賞受賞