

マイクロ波研究の 40 年と将来像

——マイクロ波研究会でのミリ波研究と APMC & MWE——

米山 務[†]

The Past Forty Years and Prospects of Microwave Research Activities

——Millimeter Wave Research and APMC & MWE in the Microwave Technical Group——

Tsukasa YONEYAMA[†]

あらまし マイクロ波研究会は、11 年間続いたマイクロ波伝送研究会から名称を変えて、1966 年、初代委員長に岡村総吾東大教授を迎えて発足した。カバーする領域は能動デバイス・回路、受動回路素子、システム、基礎理論・技術、イメージング技術と多岐にわたり、年間発表論文数も年を追って増加し、200 件を超えるまでになった。ここ 40 年にわたるマイクロ波研究会の歴史を振り返り、将来を語るのが本論文の目的であるが、ミリ波研究と国際会議 APMC & MWE に的を絞り、話を進める。ミリ波は、マイクロ波研究会発足前から今日まで続いている最も長期にわたる研究テーマであり、APMC & MWE はマイクロ波研究会挙げて取り組む最も大規模なイベントだからである。

キーワード マイクロ波研究会、ミリ波研究史、APMC と MWE

1. ま え が き

具体的なトピックスの詳細に入る前に、40 年間にわたるマイクロ波研究会の活動を概観する。まず、1970 年代は、前の時代から続いた光波とミリ波の通信分野における覇権争いに決着のついた年代として記憶される。その結果として、ミリ波は導波管伝送から無線伝送に軸足を移し、まず HIC (Hybrid Integrated Circuit) が主なテーマとなった。

その頃、米国において、アレーアンテナなどの軍用ニーズが起爆剤となり、大型ファンドに支援された MMIC の研究開発が国家プロジェクトとして本格化した。この動きが、日欧に伝わり、我が国においても次第に産業用、民生用 MMIC の研究開発が動き出した。

そのような中、1990 年、我が国で初めて、マイクロ波単独の国際会議 APMC (Asia-Pacific Microwave Conference) が開催された。その後、この会議は、MWE (Microwave Workshop and Exhibition) と

ドッキングし、我が国にとどまらず、アジア諸国のマイクロ波研究を先導する大きな組織へと成長をとげた。この頃から、携帯電話の実用化、高機能化、ミリ波無線の実用化に促され、またミリ波車載レーダが周波数帯を 77 GHz 帯にシフトして再登場したこともあり、MMIC の研究が次第に本格化した。

2000 年代に入ると、情報機器とミリ波無線を結び付け、ミリ波が本来備えている超高速性を十分に生かした各種新提案が一気に登場した。いわゆるギガビット無線であり、周波数のひっ迫問題がこの動きを押し進めたことも否めない。以下、詳細を述べる。

2. ミリ波円形 TE₀₁ 導波管の時代

マイクロ波研究会 40 年史の範囲を逸脱するが、1950~70 年代に返り、当時進行していたミリ波円形導波管通信システム開発の話をしたい。学ぶところが多く、インパクトの大きいプロジェクトだったからである。

ところで、低損失な伝送線路を開発する場合、どのようにすべきか。その鉄則を、図 1 に示す。要するに、「電界が導波管の壁に出入りしない線路構造とモードを

[†] 東北工業大学、仙台市

Tohoku Institute of Technology, Sendai-shi, 982-8588 Japan

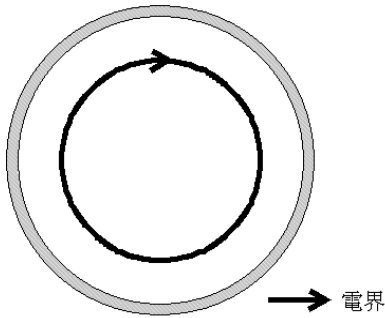


図1 低損失円形 TE_{01} 導波管
Fig. 1 Low loss TE_{01} circular waveguide.

選ぶこと」である。このようにすると伝送損は $f^{-3/2}$ に比例して、周波数の増加とともに減少する [1]。このような特性は円形 TE_{01} 導波管においてのみ実現可能であり、この原理に基づいてミリ波円形導波管の研究開発は進められた。しかし、 TE_{01} モードは高次モードであり、単一モード伝送を確保するのに苦労した。種々の技術的困難を克服し、ついに 2 dB/km という驚異的な低損失ミリ波導波管が実現したのは 1960 年代も後半になってからである。実用化試験も成功したが、努力は報われることはなかった。

1970 年、コーニング社から発表された光ファイバは伝送損 20 dB/km ながら、軽量、安価、可撓性などの魅力的特性を備え、瞬間にミリ波導波管にとって代わったのである。実際、その後の光ファイバの進歩は目覚ましく、伝送損も 0.5 dB/km を切るまでになり、「長距離伝送は光ファイバ」の時代となったのは周知のとおりである。通信技術史に残る Turnover であった。しかし、この間のばく大な技術的蓄積は、その後のマイクロ波、ミリ波開発に生かされ、多大な貢献をした。マイクロ波研究会、夜明け前の話である。

以後、ミリ波研究者の多くは光通信に移り、残った者も、ビームウェーブガイドなどを研究していたが、やがてミリ波無線、あるいはその他の分野へと方向を変えた。

3. マイクロ波/ミリ波集積回路の開発史

マイクロ波研究会が発足した 1966 年頃、我が国では金属導波管、あるいはストリップ線路に回路素子を実装した、いわゆる、HIC (Hybrid Integrated Circuit) が主流であった。これらは理論好きな研究者にとっても絶好の研究対象となり、種々の近似解法が開発された。無論 PC はなく、手回し計算機に頼っていた頃の

ことである。我が国にまだ MMIC は行きわたっていなかった。

この頃、米国から GaAs 基板とダイオードを用いた MMIC 成功の報告が届いた [2]。特に、米国では防衛・宇宙関係の大きな国家プロジェクトに絡んで巨額の開発費が動き、これが日欧を少なからず刺激した。その結果、1990 年代になると、我が国でも MMIC が移動体通信などの大きな民需を得て、急速に実用化が進んだ。

もちろん、ミリ波の分野でも MMIC は絶好の研究対象であった。前述のように、ミリ波は導波管伝送から無線へと舵をきった。長距離有線(導波管)伝送から、短距離無線伝送へと、文字どおり 180 度の方向転換である。今日の超高速無線の実用化を予測したような転進ともいえる。そして、MMIC は「マイクロ波研究会」でも常に主要テーマとして話題に上がったが、企業の技術者と製造装置をもたない大学の研究者の間で、必ずしも意思の疎通がスムーズでないこともあり、大学の研究者の一部には、ミリ波 MMIC に否定的な考えをもつ者もいた。1980 年代当初の忘れてはならない大きなトピックに、富士通三村氏による HEMT [3] の発明がある。

期待に反し、ミリ波無線の開発は予想以上に難渋している。50 GHz 帯の簡易無線 [4] は需要が延びず、60 GHz 帯では、非圧縮 HDTV 無線伝送の関係で、Gbit/s クラスの超高速伝送が要求されるからである [5]。ミリ波無線も低速伝送の場合は大した苦労もなく、特定小電力の制限下でも伝送距離は容易に 100 m を超えた。しかし、Bit Rate の増加に伴い伝送距離は急激に短くなる。室内応用に限定されるゆえんでもある。超高速ミリ波無線を妨げる要因は何か。ジッタかもしれない。とにかく、早急に阻害要因を見つけ出し、ミリ波無線の実用化に道を開くことである。初期の MMIC は GaAs 基板に作り込んだガンダイオードとショットキーダイオードといわれている [2]。初心に帰るのもあるいは一手かもしれない。

2000 年の末、思いがけないニュースが飛び込んだ。ノーベル物理学賞が、MMIC の発明(発明当時は Solid Circuit と呼ばれた)により J.S. Kilby 氏に授与されたとの報である。マイクロ波、ミリ波にかかわる者として素直に喜ぶたいが、彼の、いわゆる Kilby 特許が世界の半導体メーカを悩ませたのもまた事実である。

4. 集積回路用線路の研究

前述のように、MMIC には大学の研究者には手の届かない部分もある。そこで、特殊な装置なしでも何とかできる伝送線路の解析に特化して研究を進めるグループが出てきた。ここでは、大学、企業の研究者が同じ土俵で競い合えるからである。次に、ミリ波伝送線路の開発史について述べる。

第二次世界大戦直後、方形導波管をもとに種々のマイクロ波回路素子が製作された。しかし、間もなくより広帯域な回路素子が必要になり、遮断周波数の低いリッジ導波管が試されたが、満足な成果は得られなかった。

代わって登場したのが同軸線路であるが、回路素子製作上、構造的困難があり、種々検討が加えられた。その結果実現したのがマイクロストリップ線路である。「同軸線路の断面形状を円形から正方形、更に方形にし、側壁を取り除き、最終的に上壁と上半分の誘電体層を除去することにより、構造が簡単、印刷製法が可能、トリミングが容易などの優れた特長をもったマイクロストリップ線路 (MSL) が完成した」と発明者 R.M. Barrett は伝えている [6]。マイクロストリップ線路の成功に触発され、その後、Cohn によるスロットライン [7]、Wen によるコプレーナ線路 [8] の提案が続き、マイクロ波、ミリ波集積回路用線路の主要なラインアップが完成した。図 2 に各線路の断面図を示す。

この分野における我が国の貢献は大きい。相川、小川らによる共平面回路 [9]、両平面回路 [10] の提案、研究はよく知られている。前者はスロットライン、コプレーナ線路を基板の片面に形成したもので、後者は更にマイクロストリップ線路を他の面に形成したものである。いずれも、線路の構造と特性を理解し、巧みに活用して、機能性、集積度に優れた回路を実現している。また、チップの大幅な小型、高集積化を目的とした、徳満らによる三次元 MMIC [11] もマイクロ波研究会、IMS、APMC を大いににぎわせた。

上述のプリント線路とは異なるが、古くから研究されていたミリ波線路として誘電体線路がある。代

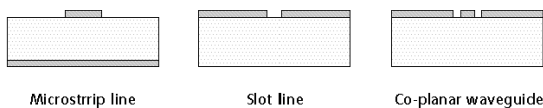


図 2 代表的なプリント線路

Fig. 2 Typical millimeter-wave transmission lines.

表例を図 3 に示す。基本的構造は D.D. King による Image Guide [12] である。セラミックロッドを導体板上に置いただけの簡単な構造であり、その簡単さが買われて、興味を示す研究者が多かったが、難点もあった。硬質のセラミックと導体が接触する面には、微細な空けきが存在し正常な動作を妨げた。これを改善したのが Insulated Image Guide [13] で、セラミックと導体面の間に軟質の薄膜を挿入している。Trapped Guide [14] では誘電体線路で unavoidable 不要放射を抑えるため、線路を溝の中に入れてある。

一方、Rib Guide は導波ストリップと基板を同質の誘電体で構成したものであり、ミリ波は主に誘電体基板を伝わり、誘電体ストリップは導波のルートを規定しているだけで、典型的な弱伝送導波路である。Strip Dielectric Guide は、誘電体ストリップより誘電体膜の誘電率が大きく、導波機構は Rib Guide と同様である。Inverted Strip Dielectric Guide [15] は Strip Dielectric Guide を転置し、導波膜が直接導体板と接触することを避けたもので、徹底的に低損失性を追及した構造である。

上述の誘電体導波路がすべて下方から線路を保持する構造であるのに対し、H-guide [15] は横から支えている。また、伝送波の電界を側壁にほぼ平行に印加しているため、円形導波管の低損失性を受け継いでいる。Grooved Guide [16] は側壁の中央部に溝を設けることにより等価的に溝部の誘電率を高め、H-guide と同様な効果をもたせている。最後の NRD-guide [17] は H-guide の側壁間隔を半波長以下に狭くして遮断効果をもたせたもので、誘電体線路に特有の放射波を抑制する効果が期待できる。

マイクロ波研究会には、線路の理論解析にたけたグループがあり、変数分離法、変分法、等価誘電率法、

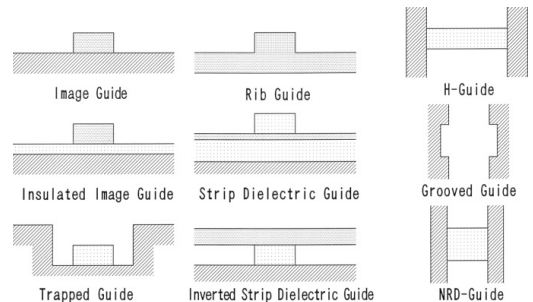


図 3 代表的な誘電体線路

Fig. 3 Typical dielectric waveguides.

有限要素法など種々の近似解法を工夫、開発し、発表した。伝送線路は、いつの時代もマイクロ波研究会を主導するトピックスとして人気があった。

5. 立体平面回路と Fin-line

MMIC 全盛の少し前、1970 年から 1980 年前半にかけて、原理的に興味深いマイクロ波回路技術が現れ、注目された。立体平面回路 [18] と Fin-line [19] である。

戦後、マイクロ波回路は導波管を用いた立体回路でスタートした。その後、平面構造のハイブリッド集積回路 (HIC) が現れ、両者併用の時代が続いた。いわば、この両者を融合したのが、立体平面回路である。導波管を E 面で二分し、打ち抜き加工した金属薄板を挿入してマイクロ波回路を構成するもので、衛星放送用のマイクロ波機器に応用された。導波管の遮断特性を巧みに利用したもので、不要モードの発生が少ない回路構造になっている。

ここで、興味あるのは、P.J. Meier により、動作原理がほとんど同じで、製法が打ち抜きからエッチングに変わっただけの Fin-line が考案され、特に米国、欧州において注目されたことである。要するに、“打ち抜き”に比べて“エッチング”は生産性に優れていること、またエッチングは基板を挟んで銅はくの配置にバリエーションを加えられることなどを評価したのであろう。興味ある回路構造と動作原理で、実用化が期待されたが、その後、両線路とも MMIC に押され、第一線から姿を消したのは残念であった。

6. APMC, MWE のこと

今、世界にはマイクロ波に関する三つの国際会議がある。米国の International Microwave Symposium (IMS)、欧州の European Microwave Conference (EuMC)、アジアの Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) である。1990 年当時、IMS、EuMC は既に活動していて、アジア地区だけが取り残されていた。

そんな状況の中、1988 年の晩秋、北京でマイクロ波国際会議があり、日本からも数人の参加者があった。会議は Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) と呼ばれ、初回が 1986 年、インドで開催され、今回が 2 回目であった。

会議中の一夜、会場のホテルのバーに 3 人の日本人が集まり、夜更けまで話し込んでいた。話題は、インドから要請された「APMC の 1990 年度日本開催」

の件である。組織、費用、会場など懸案事項を話し合い、とにかく、帰国したら主な関係者に相談するという前向きな結論で、その場を閉じた。最大の心配は、経験がないことである。なにしろ、マイクロ波関係の国際会議は 1964 年、東京、赤坂で開催された International Conference on Microwaves, Circuit Theory and Information Theory (ICMCI) 以来のことである。

帰国後、直ちに先輩諸氏に相談したところ、予想以上に賛成が多く、直ちに大会会長を斉藤成文東大教授に、募金委員会委員長を富士通研究所小口文一所長にお願いし、組織の骨格を造った。また、基調講演は初代マイクロ波研究会委員長の岡村総吾東大教授にお願いし、お引き受け頂いた。

この頃になると、強気が支配的になっていた。勢いに乗って展示会の併設を決め、準備を進めていたところ、東京、池袋の米国トレードセンタから共催の申し出があり、これを受け入れた関係で学会会場は自然に池袋のプリンスホテルに決まった。

「案ずるより産むがやすし」である。事は順調に進み、学会は成功裡に終了した。このときほど、先輩諸氏及び関連企業の力添えに感謝し、また感激したことはない。学会参加者は予想以上に多く、展示会の収益も期待を超えた。もちろん、内容も国際会議に十分値するものであった。日本開催の APMC の成功はアジア諸国を勇気づけ、懸案であった会議のアジア諸国持ち回り開催がスムーズに決まり、日本開催も希望どおり 4 年ごととなった。他国の 2 倍のペースである。以後、APMC 開催は順調に推移し、今日に至っている。

問題は、4 年ごと開催の間をつなぐことである。この間を休業状態に放置しておくわけにはいかない。組織維持と士気に影響するからである。そこで、この間をワークショップと展示会にあてることにし、MWE (Microwave Workshop and Exhibition) を組織した。

単に、つなぎ役としてではなく、内容の充実も図った。例えば、プログラムは基礎講座、ワークショップ、パネルセッションから構成されている。基礎講座は「伝送理論」、「フィルタ」、「アンテナ」など学部学生向けのテーマを選んで、その分野の専門家に 3 時間程度の充実した講義をお願いする。ワークショップは圧巻で、15 以上の関心の高いトピックスを選び、各トピックについて 5 名程度の専門家に密度の濃い講演をお願いするというもので、MWE の呼び物になっている。また、展示会は、関連企業に出展をお願いするとともに、各

大学のマイクログ波関連研究室にも無料出展の機会を提供している。運営には、IEICE 傘下の APMC 国内委員会及び MWE 実行委員会あたり、70 名を超える大学、企業のマイクログ波研究者/技術者がボランティアで参加している。

APMC の派生効果として、韓国、中国との間で、それぞれ、Korea-Japan Joint Microwave Conference, China-Japan Joint Microwave Conference を隔年ごとに開催し、切磋琢磨し合っている。その効果は顕著で、APMC の採録論文件数は、3 国ほば肩を並べる状態である。

以上、縷々述べたように、APMC 及び MWE は、今や国内外に名の知られたイベントとなったが、その価値はむしろ継続にある。この 40 年にわたるマイクログ波研究の歴史を語るとき、その後半をカバーする APMC & MWE の活動及びそれを支えた人脈を無視するわけにはいかない。これらの活動は、将来にわたって継続され、また新たな歴史を創っていくものと確信している。

7. これからの「マイクログ波研究会」

将来に目を向けると、APMC & MWE と「マイクログ波研究会」は更に協調関係を強め、我が国は無論、アジア地区、世界全体のマイクログ波技術の発展に貢献していくことは間違いない。そこから、種々の新分野が展開されるであろう。

(a) まず、期待されるのは、メタマテリアルである。一体何が出てくるか、予測不能の部分があり、ビックリ箱の魅力に富んでいる。今後の展開が楽しみな分野である。

(b) テラヘルツ波は、光と電波の境界領域にあり、両岸の特徴を併せ持つスペクトルである。当面は、光領域固有の分光やイメージングへの応用に関心が集まるものと思われるが、やがて、電波領域固有の技術、例えば、10 Gbit/s を超える超高速極短距離テラヘルツ無線などにも関心が向くものと思われる。

(c) 上述のテラヘルツ無線と軌を一にするが、従来の常識を覆す技術に、数ミクロンから数メートル程度の極短距離で行われる近接無線がある。今後その応用範囲を次第に拡大していくものと期待される。無線通信において、距離の条件を外すと、新しい概念、技術が一気に出てくる予感がするからである。RFID がいい例である。

(d) 現在開発が進んでいる 60 GHz 帯を一気に飛

び越えて、120 GHz 帯を用いた超高速大容量無線が北京オリンピックでデビューした。将来性がある技術である。今後、無線でもますます大容量超高速通信が求められるのは明らかであり、60 GHz 帯だけでは対応しきれない事態が到来することが予想される。そのとき、格段に高速伝送特性に優れ、伝送距離も長いといわれる 120 GHz 帯に期待するところは大きい。

以上、今後期待されるマイクログ波、ミリ波、テラヘルツ波技術について述べた。無論、これ以外のものも多々あるであろうが、その議論は、マイクログ波研究会の英知に期待したい。

8. む す び

マイクログ波研究会の 40 年について思い出すままに述べた。この 40 年間、消失した研究テーマも多いが、依然として有力なテーマであり続けているものもある。ミリ波は後者の代表例であり、通信技術にとどまらず、環境、セキュリティ、医療など、かかわるところも多様である。次の 40 年間のマイクログ波研究会を語るとき、果たしてミリ波はどうなっているのか。APMC は依然として存在価値があるのか。期待を込めて、マイクログ波研究会の発展を祈念する次第である。

謝辞 原稿作成にあたり御協力頂いた、東北工業大学講師沢田浩和氏、株式会社エムメックス研究開発部長川原祐紀氏の両名にこの場を借りて謝意を表する。

文 献

- [1] 安達三郎, 米山 務, 電波伝送工学, p.161, コロナ社, 1981.
- [2] T.M. Hyltin, "Integrated 94 GHz local oscillator and mixer," U.S.Patent 3,534,267, filed Dec. 30, 1966 and issued Oct. 13, 1970.
- [3] T. Mimura, "The early history of the high electron mobility transistor (HEMT)," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.50, no.3, pp.780-782, March 2002.
- [4] 古濱洋治, 島貫義太郎, "50 GHz 帯通信," テレビ誌, vol.38, no.8, pp.730-735, 1984.
- [5] "ミリ波帯無線システムの最新動向," MWE2008 Digest, WS19, pp.452-468, Nov. 2008.
- [6] R.M. Barrett, "Microwave printed circuits — The early years," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-32, no.9, pp.983-990, Sept. 1984.
- [7] S.B. Cohn, "Slot-line — An alternative transmission medium for integrated circuits," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.104-109, May 1968.
- [8] C.P. Wen, "Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for non reciprocal gyromagnetic device application," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-17, no.12, pp.1087-1090, Dec.

- 1969.
- [9] T. Hirota, Y. Tarusawa, and H. Ogawa, "Uniplanar MMIC hybrids — A proposed new MMIC structure," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-35, no.6, pp.576–581, June 1987.
 - [10] M. Aikawa and H. Ogawa, "Double-sided MIC's and their applications," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.37, no.2, pp.406–413, Feb. 1989.
 - [11] T. Tokumitsu, M. Aikawa, and K. Kohiyama, "Tree-dimensional MMIC technology: A possible solution to Masterslice MMIC's on GaAs and Si," IEEE Microw. Guided Wave Lett., vol.5, no.11, pp.411–413, Nov. 1995.
 - [12] D.D. King, "Dielectric image line," J. Appl. Phys., vol.23, pp.699–700, June 1952.
 - [13] R.M. Knox, "Dielectric waveguide microwave integrated circuits — An overview," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-24, no.11, pp.806–814, Nov. 1976.
 - [14] T. Itoh and B. Adelsech, "Trapped image guide for millimeter-wave circuits," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-28, no.12, pp.1433–1436, Dec. 1980.
 - [15] F.J. Tischer, "A waveguide structure with low loss," Arch. Elek. Ubertragung, vol.7, pp.592–596, Dec. 1953.
 - [16] 中原恒雄, 倉内憲孝, "溝付ガイドの伝送姿態," 信学誌, vol.47, no.7, pp.1029–1036, July 1964.
 - [17] T. Yoneyama and S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-29, no.11, pp.1188–1192, Nov. 1981.
 - [18] 小西良弘, 上中田勝明, 矢沢紀彦, 星野紀甫, "平面回路を立体的に配した新マイクロ波回路 (立体平面回路) 技術," 信学技報, MW72-84, Dec. 1972.
 - [19] P.J. Meier, "Two new integrated circuit media with special advantages at millimeter wavelengths," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.221–223, May 1972.

(平成 20 年 12 月 24 日受付)



米山 務 (名誉員)

昭 34 東北大・工・通信卒。昭 39 同大大学院博士課程了。同年東北大・工・通信助手。昭 40 同大電気通信研究所助教授。昭 61 同教授。平 11 東北工大教授。現在、東北大、東北工大名誉教授、(株)エムメック代表取締役。ミリ波の研究に従事。科学技術庁長官賞、平 8 本会業績賞、平 9 本会功績賞等受賞。共著「電波伝送工学」。IEEE Life Fellow。