

# 表面波放射器

—導体表面を伝はんする電波とその応用—

森 脇 義 雄・河 村 達 雄

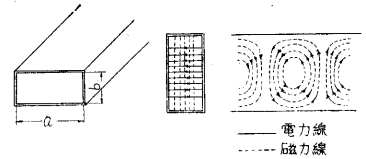
1. 緒 言 最近世界各国においてマイクロ波の研究、実用化が盛んに行われている。マイクロ波は極超短波、すなわち周波数が大体 1,000 Mc から 30,000 Mc の間の電波であるが、このような電波は戦時中レーダー等の電波兵器に盛んに用いられ、その進歩の結果が終戦後電気通信の分野にも応用されて、従来の同軸ケーブルや無装荷ケーブルにとって代ろうとする状態になってきた。

マイクロ波通信が日本の地理ないしは気象上の条件に適合していることから、わが国でも早くからその実用化研究が行われた。日本電信電話公社では、1949年パルス位置変調方式の試験を行い、その後この結果は日本国有鉄道、電力会社等でとり上げられて続々と日本各地にマイクロ波の回線が建設されるようになった。NHKでは東京一大阪間にわが国で始めて 4,000Mc のテレビジョンの中継回線の作成に成功した。一方日本電信電話公社では、テレビジョンの伝送または電話 480 回線の中継ができる 4,000Mc 帯の中継方式を計画して、1954 年東京一大阪間の建設を完了し、さらに大阪—福岡、東京—仙台—札幌間の建設が行われている。

このようにマイクロ波が戦後電気通信界に登場したのは、これが次のようないろいろの特長を持っているからと思われる。次にこれについて簡単に述べてみよう。その第 1 に空中線の指向性が良好であることがあげられる。空中線の大きさを同じにすれば、周波数の高い方が鋭いビーム状の電波を放射することができるが、マイクロ波によく使われているパラボラやパスレングスアンテナ等では最大放射方向の電力の半分になるビームの巾(半値巾)が 2°程度のもので得られている。したがって空中線から一方向へ電波を送ることができるため、比較的小電力で通信を行うことができるわけである。次の特長としては、周波数帯域を広くとることができる点である。通信をする場合には必ずある周波数帯域を必要とし、これが広くとればとれるほど安定な、良質の通話品質が得られる。テレビジョンや 480 通話路程度の電話を数ルート送る場合に、できれば空中線等を共用し必要となる周波数帯域を無調整で送れるようにする方が望ましい。このためにたとえば空中線は、500 Mc 程度の帯域にわたって充分能率よく電波を放射させるようにすればよい。中心周波数 4,000 Mc に対して 500 Mc は 12% 程度であるが、これより低い周波数では、このように広

い帯域をとることは困難である。その他の特長としては伝はん特性が比較的安定であること等があげられる。

マイクロ波に使う伝送線路としては、導波管および同軸ケーブル等がある。導波管とは切口断面が矩形(第 1 図)あるいは円形の中空の管であって、この中を電波が光速よりも速い位相速度で伝わ



っていくものである。第 1 図 矩形導波管およびその電磁界。普通使っているのは切口断面が矩形の導波管であるが回転部などには一部円形導波管を使うこともある。これに対して同軸ケーブルとは導体でつくった同心の内外導体の間に電磁波を伝はんさせるものであって、内外導体の間には低損失の誘電体(たとえばポリスチロール等)をつめたり、適當の箇所を誘電体あるいは導体で支えたりする。導波管では同軸ケーブルのように内側導体がないために、機械的に簡単になり、最大電力容量が大きく、減衰は少ないのでマイクロ波帯で最も多く利用されている。

しかし 1950 年に G. Goubau が表面波伝送線路を提案し<sup>(1)</sup>、これが従来の導波管や同軸ケーブルに比していろいろの利点を持っているために注目され、種々の研究も行われまた一部実用化も行われている。これは 1 本の導線の表面に低損失の誘電体(たとえばポリエチレン、エナメル等)を被覆したものである。このようにすれば、進行方向の伝はん速度が光速よりも遅くなるために、導線の表面に電磁エネルギーが集中し、放射が起らずにエネルギーを一方から他方へ送ることができるのである。平面導体上に同じような細工を施した場合にも、その表面上に電磁波が伝はんすることは容易にわかる。

筆者らは、このような表面波の特性およびその応用について多くの研究を行っているが、次に円筒導体上の表面波すなわち表面波伝送線路、および平面導体上の表面波の特性についてもう少し詳しく述べ、その一つの応用として表面波放射器について述べてみよう。

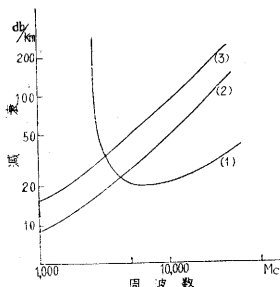
2. 導波管および表面波伝送線路の性質 最もよく利用されている矩形導波管の断面の二辺の長さを  $a, b$  とする。このような導波管では周囲の壁の条件を満足するような電磁界は無数に存在し、これらをそれぞれ伝送姿態と呼んでいるが、実用になっている姿態の電磁界分布

は第1図のようになり、進行方向には磁界の成分のみが存在する電氣的横波 (Transverse Electric Wave, 略してTE波) またはH波である。第1図のような姿態の導波管では、

$$\lambda_c = 2a \quad (1)$$

で決まる波長 (これをしや断波長と呼んでいる) より長い波長の波は減衰を生じ、伝送されない。すなわち導波管は1種の高域ろ波器としての性質を持っているわけである。しや断周波数以上の周波数では電波が伝播するが、導波管の壁面に電流が流れると、管壁の導電率は有限であるから、ここで電力損失がおり、エネルギーが減衰する。4,000 Mc 用の導波管(a, b がそれぞれ58mm, 29mm) の減衰定数を求めると第2図のようになる。

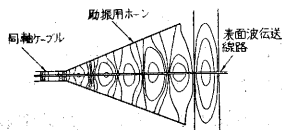
有限の導電率の円筒状導体が自由空間中にある場合、



- (1) 4,000 Mc 用矩形導波管
- (2) 表面波伝送線路(#9線)
- (3) 表面波伝送線路(#12線)

この表面上を電波が放射することなく伝播することはすでにSommerfeldによって明らかにされている。これは導体の導電率が有限の場合にだけ存在するので、完全な導体(すなわち抵抗が零)ではこのような電波は存在しない。いいかえれば導電率が有限であるために、電磁界の位相速度を遅らせて電磁界を導体付近に集中させて送ることができるのである。この点には上に述べた導波管や同軸ケーブル等と全く趣を異にしている。導波管、同軸ケーブル等では、導体が完全導体に近ければ近いほど損失が少なく、したがって理想的の伝送線路に近くなる。電磁界の位相速度を遅らせるためには必ずしも導体の導電率を有限にする必要はなく、導体の表面にたとえば損失の少ない誘電体を被覆したり、導体の表面に周期的の変形(たとえばせん形の溝を切る等)によっても得られる。このようにすれば必ずしも導体の導電率を有限にする必要のないことが明らかになった。これが1950年 G. Goubau によって提案された表面波伝送線路の考え方である。

表面波伝送線路は軸対称の電波であるから、これを励振するには軸対称の同軸ケーブルによるのが便利である。すなわち第3図に示すように同軸ケーブルの外側導体を次第にひろげて円錐形のホーンの形とすれば、同軸



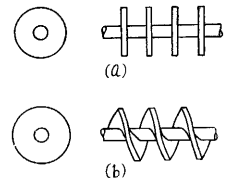
第3図 表面波伝送線路付近の電界およびその励振方法

く、表面波伝送線路の電磁界は理論的に無限に広くひろがっているので、有限の開口面積のホーンを使えば、ホーンの外に含まれるエネルギーは励振の際の損失となる。ホーンの開口の面積を大きくすればするほどこの損失を小さくすることができる。

誘電体を被覆した線路では、導体の導電率が無限大であっても電波は伝播するはずであるが、実際にはこれは有限であり、ここに電流が流れればエネルギーの損失がおこる。これは導体の半径によってもかなり変化するが1例として#8線と#12線についてその損失を計算した結果を第2図にあわせて記してある。その損失は導波管とはほぼ同程度のものであることがわかる。

表面波伝送線路と導波管、同軸ケーブルとを比較すると、導波管および同軸ケーブルでは、まわりは導体で囲んであるため電磁エネルギーはここから外に洩れることはないが、表面波伝送線路ではエネルギーが空間中に分布している。(これを open system という)。ために線路を曲げたり垂下させたり、また線路を支持したりする際には、ここで電磁波の放射がおこり、損失を生ずる。その具体的値は本誌で述べられているので<sup>(2)</sup>、ここでは述べないが、実際に線路を設計する場合にはこの点に充分注意する必要がある。

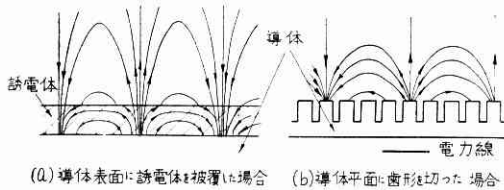
前にも述べたように電波の位相速度を遅らせるために必ずしも誘電体を被覆する必要はなく、導体の表面に周期的の変形を施してもよい。たとえば第4図(a)のように円板を設けたり、同図(b)のようにらせんを切ったりしてもよい。この場合に伝播する波の位相速度もやはり遅くなる。このような線路を corrugated waveguide と呼んでいる。マイクロ波の発振、増巾などに使う



第4図

進行波管では電子と電波との相互作用を利用しているので、電子と同程度の速度で進行する電波が必要となる。このような場合には光の速度よりも遅い電波を必要とする。このためには普通らせん形の線路を使っているがこれに corrugated waveguide を使うこともできる。

3. 平面導体上の表面波 前節で考えたことから、平面導体上に低損失の誘電体を被覆するか、または表面上に周期的の変形を施せば、この上に電波が伝播することがわかる。この場合には磁界は常に溝の方向に沿った成分、すなわち進行方向には成分は無く、電界は進行方向にも成分を持っている。このような電波は磁氣的横波 (Transverse Magnetic Wave, 略してTM波) またはE波と呼ばれている。その電磁界の模様は第5図に示してある。この場合にも伝播する波の位相速度は光速より遅くなるが、いま溝の中、歯の中、溝の深さをそれぞれ  $G, T, h$  とすると、面上を伝播する波の速度  $v$  は近



(a) 導体表面に誘電体を被覆した場合 (b) 導体表面に溝形に切った場合

第 5 図 平面導体上の表面波の電界分布  
似的に次のように表わすことができる。

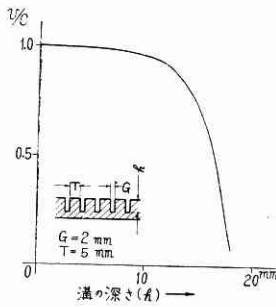
$$v = c \left[ 1 + \left( \frac{G}{G+T} \right)^2 \tan^2 \frac{2\pi fh}{c} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $f$  は電波の周波数

$c$  は光速

$G=2\text{mm}$ ,  $T=5\text{mm}$  として溝の深さ  $h$  を変えた場合の速度の変化を計算すると第 6 図のようになる。

4. 表面波放射器<sup>(4)</sup> 表面波線路の場合では、電磁エ



第 6 図 溝の寸法と位相速度との関係

ネルギーの放射がおけると損失が増加するので、これはできるだけ避けることが望ましい。しかしここでは平面導体上で起る放射を積極的に利用してこれを放射器として使うことを考えてみよう。

伝送線路として導波管を使うことにすれば、導波管から平面導体に電波を

導く装置が必要となってくる。

前にも述べた如くマイクロ波で通信をする場合には、非常に広い伝送帯域を必要とするため、周波数がかかなり変わっても充分能率よく電波を放射させることが必要である。すなわちある範囲の周波数に対しては、導波管中を送られてきた電波を自由空間に出す際にここで反射を起さないで放射させることが必要である。この目安をつける方法として V. S. W. R. (Voltage Standing Wave Ratio, 電圧定在波比) で表わすのが普通である。すなわち反射波があるとここで定在波が生ずるので、電界の最大値を  $E_{max}$ 、最少値を  $E_{min}$  とするとき、

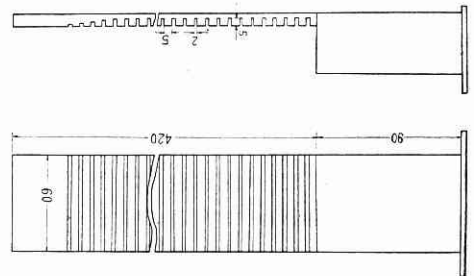
$$\text{V. S. W. R.} = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad (3)$$

で反射の割合を表わすことができる。最も理想的な反射波のない場合では、 $E_{max} = E_{min}$  すなわち V. S. W. R. = 1 となり、マイクロ波の機器ではこの整合の状態にさせることが望ましい。

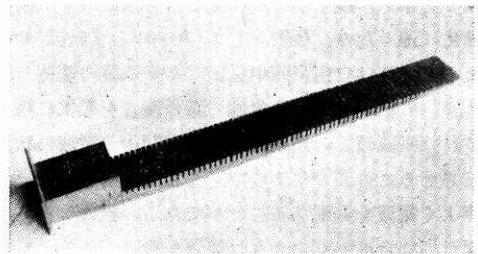
マイクロ波の放射器として要求されるもう一つの点は指向特性を鋭くさせることである。このためには、放射器から放射させる際に電波を平面波に近い状態にすることが必要

である。いま考えている装置では誘電体を被覆した場合にはその厚さを変えたり、溝形の場合にはその溝の寸法を変えて自由に位相速度を調整することができるので大変便利である。

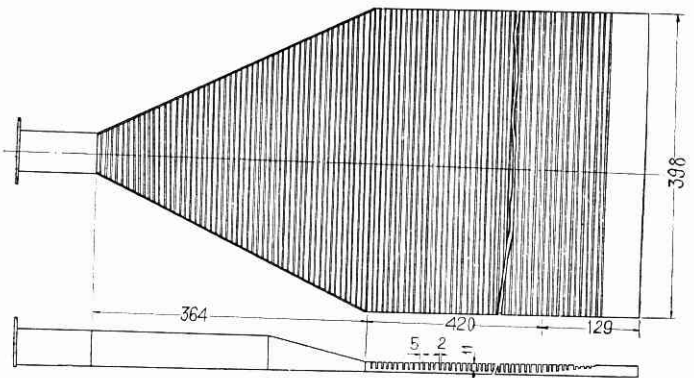
試作した放射器の構造を第 7 図、第 9 図に示してあり、その概観は第 8 図および第 10 図に示してある。試作器 B では導波管から比較的広い溝形平面に電波を導いている。一方向に強い電波を放射させるためには、電波が平面上で平面波に近い状態で進むようにする必要がある。導波管から発する波は球面波であるから、その波頭を平面波に直すには次のようにすればよい。第 11 図の OAC の部分で導波管から発する波は波源が O の球面波と考えることができるから、その波頭はたとえ A'B'C' のようになる。ここで OA 方向の伝はん速度を OB よりも速くしてやれば、A'B'C' は ABC に近づき伝はん速度の比を伝はん距離に反比例するように決めればその波頭は常に ABC に平行となり、したがって溝形平面上で平面波の状態になるように給電することができる。す



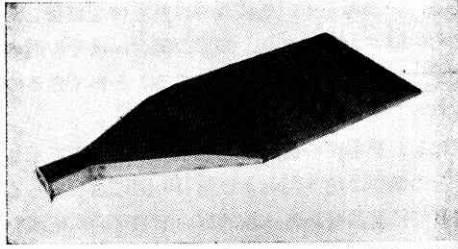
第 7 図 試作器 A



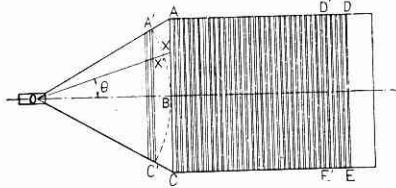
第 8 図 試作器 A の概観



第 9 図 試作器 B



第11図 第10図 試作器Bの概観



なわち  $\theta$  方向に伝はんする波の位相速度を  $v_\theta$  とするとき

$$\frac{OX}{v_\theta} = \frac{OB}{v_0} \quad (4)$$

すなわち

$$\frac{v_\theta}{v_0} = \frac{OX}{OB} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (5)$$

を満足するようにさせればよい。溝の深さを変えれば、位相速度が変化し、その様子は第6図に示してあるのでこれを使って OAB の部分の溝の深さを決めることができる。

このようにして平面上に表面波を導くことができたが、この面から自由空間中に電波を放射させる際にここで、反射が起ったのでは大変都合が悪い。しかしここで次のような考慮をすればよいことがわかる。(2)式で溝の深さを順次に浅くしてやればここを伝はんする波の位相速度は速くなり、極限として  $h \rightarrow 0$  とすれば  $v/c \rightarrow 1$  となる。これは自由空間中を伝はんする波の速度と同じであり、これから歯形の先端で溝の深さを順次に浅くしてやれば表面波から連続的に自由空間中の電波の状態に移行させることができるので、ここで反射を起させずに効率よく電波を放射することができる。試作した A, B いずれの場合にもこのような装置を設けてある。

次にこのような装置についてその性能を実験した結果について、簡単に説明することにしよう。

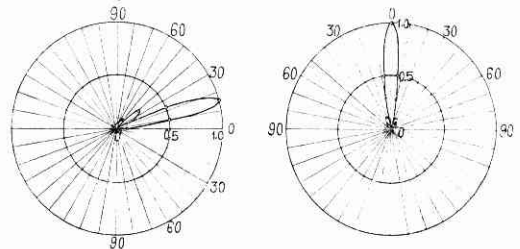
**整合特性** 試作 A, B を使って自由空間中にエネルギーを放射させ、電源から見た V. S. W. R. を測定した。

その結果は、

試作 A では 3,800Mc ~ 4,300Mc の帯域にわたって V. S. W. R. < 1.09

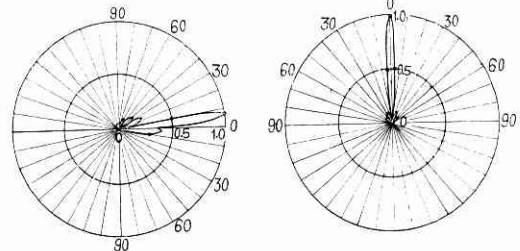
試作 B では、同上の範囲で V. S. W. R. < 1.15 でその特性はかなりよい。

**指向特性** 同上の装置の指向特性を求めたものが第12図および第13図である。ここで H 面というのは磁界と平行な面、すなわち歯形平面と平行な面のことであり、E 面とはこれと垂直な面すなわち導波管の短い巾の面と平



(a) E 面 (b) H 面

第12図 指向特性曲線 (試作器 A)



(a) E 面 (b) H 面

第13図 指向特性曲線 (試作器 B)

行な面のことである。その結果を次に示すと、

試作 A では	半値巾	E 面 約 14°
		H 面 約 14°
試作 B では	半値巾	E 面 約 6°
		H 面 約 7°

となり小型の割にはかなりよい特性といえる。

**5. 結言** 以上歯形回路を利用した放射器について述べたが、その特長としては次のようなものが考えられる。

- (1) 無調整で整合がとれること。
- (2) 相当広い帯域にわたって良好な整合がとれること。(試作器 B では 4,000 Mc 帯で 500 Mc の帯域にわたって V. S. W. R. < 1.15.)
- (3) 指向特性もかなりよく、これと同じ半値巾のホーンに比してかなり小型にできる。
- (5) 形状が扁平で従来のものに比して特殊の形状をしているため、これを生かすことができる。

このような特性があるために、これを巧みに利用すればかなり広く利用できるものと思われる。(1956.9.6)

文 献

- (1) G. Goubau, "Surface Waves and their Application to Transmission Lines." J. A. P. **21** (1950) p. 1119
- (2) 森脇, 猪瀬, "マイクロ波の給電線" 生産研究, 第3巻, 第11号, p. 419
- (3) W. Rotman, "A Study of Single-Surface Corrugated Guides." P. I. E. E. **39** (1951) p. 952
- (4) 森脇, 河村, "歯形回路を用いたふく射器". 昭和31年電気三学会連合大会論文集 **586** p. 586