

## ■9 群 (電子材料・デバイス) - 7 編 (マイクロ波伝送・回路デバイス)

---

### 3 章 各種導波路

(執筆者: 橋本 修) [2010 年 7 月 受領]

#### ■概要■

本章では、金属や誘電体で構成された各種導波路について解説している。

解説では、最初に金属で構成された同軸ケーブル、方形導波管と円形導波管を説明し、その後、導体上に誘電体を配置した導波路や、断面が円形上の誘電体導波路、更には、誘電体を金属板の挟んだ構成の NRD ガイドについて解説している。

#### 【本書の構成】

本章は、「3-1 節 同軸ケーブル」、「3-2 節 導波管」、「3-3 節 誘電体線路」、「3-4 節 NRD ガイド」で構成されており、大きく金属と誘電体で構成された導波路を網羅して解説している。

## ■9 群-7 編-3 章

### 3-1 同軸ケーブル

(執筆者：黒木太司) [2009年1月 受領]

円形状からなる中心導体と接地導体同心状に相対した構造の同軸ケーブルは、低周波域では直流や商用交流の電力伝送用として、V/UHF 帯やセンチ波帯では短・中・長距離情報信号伝送用として、また低周波域からミリ波帯にわたり測定信号伝送用として、広い用途に利用されている。本節では、この同軸ケーブルの線路定数及び各種ケーブルの実用例などを概説する。

#### 3-1-1 同軸ケーブルの線路定数

同軸ケーブルは半径  $a$  なる中心導体と内半径  $b$  なる接地導体が **図 3・1** のように同心状に相対した構造であり、それぞれの導体を支持するため、両導体間には一般に比誘電率  $\epsilon_r$  の誘電体が充填される。伝送波は同図に示すような TEM 波であり、導波管と違って遮断周波数がないことから直流から使用できる。ただし、周波数の上昇とともに高次モード<sup>1)</sup>が発生することから、その遮断周波数が同軸ケーブルの動作周波数の上限を与える。

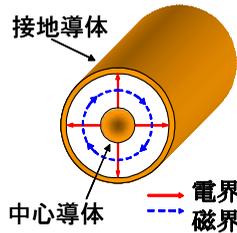


図 3・1 同軸ケーブルとその電磁界分布

同軸ケーブルの特性インピーダンス  $Z_c$  及び位相定数  $\beta$  は、真空の誘電率と透磁率を  $\epsilon_0$  及び  $\mu_0$ 、動作周波数を  $f$  として次式で与えられる。

$$Z_c = \frac{\zeta_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad [\Omega], \quad \beta = 2\pi f \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r} \quad [\text{rad/m}]$$

一般に、この特性インピーダンスは 50  $\Omega$  及び 75  $\Omega$  に設定される。

同軸ケーブルの導体損失  $\alpha_c$  及び誘電体損失  $\alpha_d$  は、中心導体と接地導体の導電率を  $\sigma_a$  及び  $\sigma_b$ 、支持誘電体の誘電正接を  $\tan \delta$  として、

$$\alpha_c = \frac{1}{2} \sqrt{\pi \epsilon_r \epsilon_0} f \left( \frac{1}{a\sqrt{\sigma_a}} + \frac{1}{b\sqrt{\sigma_b}} \right) \quad [\text{Np/m}], \quad \alpha_d = \zeta_0 \pi f \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0} \tan \delta \quad [\text{Np/m}]$$

で表される<sup>2)</sup>。上式によれば、同軸ケーブルの導体損失は周波数の 1/2 乗に、また誘電体損失は周波数に比例して増加する。一般に支持誘電体としては超高周波帯で誘電正接が  $10^{-3}$  程度及びそれ以下の低損失なポリエチレンやテフロンなどが用いられるので、同軸ケーブルの伝送損失は低周波域では導体損失が支配的であり、周波数の上昇とともに誘電体損失の影響が現れてくる。

### 3-1-2 同軸ケーブルの実際

低周波域における同軸ケーブルでは支持誘電体にポリエチレンが用いられ、接地導体は、可とう性をもたせるために細い銅線を編組することにより構成される（フレキシブルケーブル）。高周波域では支持誘電体として低損失なテフロンが用いられ、また接地導体は伝送波の漏れや特性インピーダンスの不均一性を抑制するために銅管が用いられる（セミリジッドケーブル）。長距離信号伝送用の通信用同軸ケーブルでは、誘電体損失を低減するために支持誘電体に代わり、ポリエチレン円板を中心導体に周期的に装荷したもの<sup>3)</sup>などが用いられる。

#### ■参考文献

- 1) N. Marcuvitz, "Waveguide Handbook," vol.10, Radiation Lab. Series, McGraw-Hill, 1951.
- 2) D. M. Pozar, "Microwave Engineering, 2nd Edition," John Wiley & Sons Inc., 1998.
- 3) 畔柳, 塩谷, "通信工学通論," コロナ社, 1994.

## ■9 群-7 編-3 章

### 3-2 導波管

(執筆者：黒木太司) [2009年1月 受領]

センチ波からミリ波にわたる超高周波帯伝送線路としては金属導波管が多用される。これは電磁波を閉じ込めて伝送させる中空金属管の総称であり、方形及び円形断面からなる形状が用いられる。導波管は同軸線路や平行2本線路などのような二導体系ではなく、閉じた導体のみで構成されることから、その伝送波は TEM 波とは異なり、遮断周波数を有する TE 及び TM 波になる。また構造は堅牢であり、二導体系伝送線路に利用される支持誘電体が不要となることから伝送損失を低く抑えることができるという特徴がある。

本節では、方形導波管及び円形導波管について述べる。

#### 3-2-1 方形導波管<sup>1)</sup>

最も一般的に利用される導波管は、幅  $a$ 、高さ  $b$  からなる長方形の中空導波管であり、その概略を図 3・2(a)に示す。この導波管を  $z$  方向に伝送する伝送波は TE モードと TM モードに大別され、また各モードは  $x$  方向次数  $n$  と  $y$  方向次数  $m$  により、更に細分される。最も多く利用されている方形導波管の形状は  $a = 2b$  であり、この形状における各モードの遮断波長  $\lambda_c$  を低次から計算し、表 3・1 に示す。これより方形導波管の最低次モードは、図 3・2(b)に示すような電磁界分布からなる、遮断波長  $2a$  の TE<sub>10</sub> モードになる。またその第 1 高次モードは遮断波長  $a$  の TE<sub>20</sub> あるいは TE<sub>01</sub> モードであり、方形導波管は一般に、TE<sub>10</sub> モードの動作波長がこれら遮断波長の間になるよう設計される。

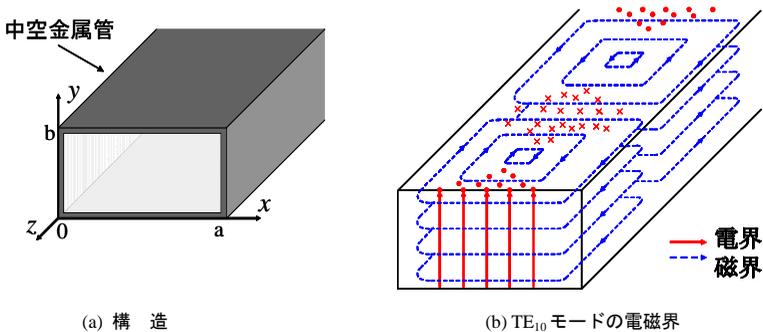


図 3・2 方形導波管

表 3・1 方形導波管の遮断波長

モード名	モード次数		遮断波長 $\lambda_c$
	$n$ ( $x$ 方向)	$m$ ( $y$ 方向)	
TE <sub>10</sub>	1	0	$2a$
TE <sub>20</sub>	2	0	$a$
TE <sub>01</sub>	0	1	
TE <sub>11</sub>	1	1	$0.894 a$
TM <sub>11</sub>	1	1	

導波管の  $z$  方向位相定数  $\beta$  は真空の波数を  $k_0$  として  $\beta = \sqrt{k_0^2 - (2\pi/\lambda_c)^2}$  で与えられる。図 3・3(a) に真空の波数で規格化した  $TE_{01}$  モードの位相定数の周波数特性（分散特性）を示すが、導波管の位相定数は遮断周波数  $f_c$  以下の周波数帯では 0 となり、伝送波は遮断される。また  $f_c$  以上の周波数帯では周波数の上昇とともに位相定数は真空の波数に漸近する。

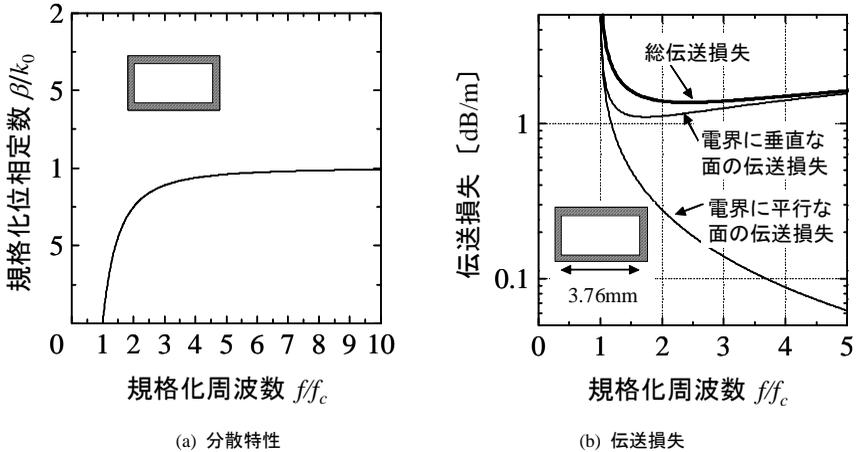


図 3・3  $TE_{10}$  モード方形導波管の伝送特性

$TE_{10}$  モードの伝送損失  $\alpha_{E10}^R$  は  $a = 2b$  の場合、 $\sigma$  を金属管の導電率、 $\zeta_0$  ( $\cong 120\pi$ ) を真空中の電波インピーダンス、 $\nu$  を遮断周波数で規格化した周波数  $f/f_c$  として

$$\alpha_{E10}^R = \sqrt{\frac{2\pi}{\sigma\zeta_0}} \frac{a^{-3/2}}{\sqrt{\nu^2 - 1}} \left\{ \nu^{-1/2} + 3/2 \right\} \text{ [Np/m]}$$

で表される。図 3・3(b) に  $a$  を 3.76 mm とした場合の伝送損失の計算値を示す。周波数の上昇とともに電界に平行な金属面の損失（上式括弧内第 1 項目）は減少するが、これはこの金属面の高周波電流が伝送波の進行方向に対して横方向（ $y$  方向）にのみ分布しているためである。なお電界に垂直な金属面のそれ（上式括弧内第 2 項目）は周波数の上昇とともに増加し、結果としてこれらを合わせた  $TE_{10}$  モードの伝送損失は、周波数の増加とともに後者の値に漸近する。

### 3-2-2 円形導波管<sup>1)</sup>

半径  $a$  からなる円形導波管の構造を図 3・4(a) に示す。この導波管の伝送波も  $TE$  及び  $TM$  モードからなり、更にこれらは  $\theta$  方向と  $r$  方向のモード次数に細分される。ここではアンテナの給電線路として用いられる  $TE_{11}$  モード、及びミリ波低損失伝送線路として注目された  $TE_{01}$  モードの電磁界分布の概要及びその遮断波長  $\lambda_c$  を図 3・4(b) に示す。

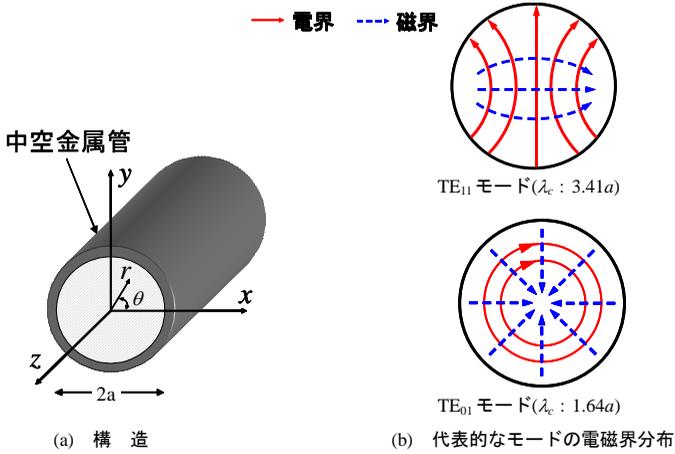


図 3・4 円形導波管

位相定数は方形導波管のそれと同様に  $\beta = \sqrt{k_0^2 - (2\pi/\lambda_c)^2}$  で表され、TE<sub>11</sub> 及び TE<sub>01</sub> モードの伝送損失  $\alpha_{E11}^c$  及び  $\alpha_{E01}^c$  は次式で与えられる。

$$\alpha_{E11}^c = \sqrt{\frac{\pi}{3.14\sigma\zeta_0}} \frac{a^{-3/2}}{\sqrt{\nu^2-1}} \left\{ \nu^{-1/2} + 0.419\nu^{3/2} \right\} \text{ [Np/m]}$$

$$\alpha_{E01}^c = \sqrt{\frac{\pi}{1.64\sigma\zeta_0}} \frac{a^{-3/2}\nu^{-1/2}}{\sqrt{\nu^2-1}} \text{ [Np/m]}$$

図 3・5 に半径 4.57 mm の円形導波管におけるこれらのモードの伝送損失を示す。TE<sub>11</sub> モードの伝送損失は、遮断周波数近傍では周波数の増加とともに減少するが、その後増加していく。これに対し TE<sub>01</sub> モードのそれは、周波数の上昇とともに減少するという特異な性質を示すが、これは導波管内壁を流れる高周波電流が、z 方向に対して横方向 ( $\theta$  方向) にのみ分布するためである。

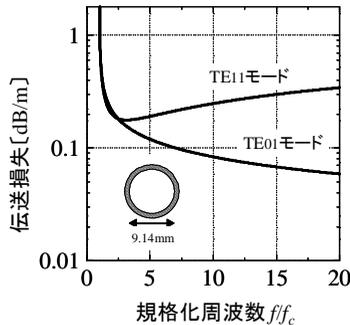


図 3・5 円形導波管における各モードの伝送損失

■参考文献

- 1) N. Marcuvitz, “Waveguide Handbook,” vol.10, Radiation Lab. Series, McGraw-Hill, 1951.

## ■9 群-7 編-3 章

### 3-3 誘電体線路

(執筆者：黒木太司) [2009年1月 受領]

誘電率の高い媒質と誘電率の低い媒質が接している境界面に、誘電率の高い媒質側から電磁波を斜め入射させた場合、ある入射角の範囲内でこの電磁波は境界面から完全反射する。誘電体線路はこの性質を利用して電磁波を誘電体媒質中に閉じこめて伝送させるものであり、伝送波は進行方向に電界と磁界を有する混成波ではあるが、主たる導波媒体が誘電体であるため金属の影響は少なく、石英やテフロンなどの低損失誘電体材料を用いることにより、ミリ波以上の周波数帯で低損失伝送線路を実現することができる。

この誘電体線路は主に光通信システムに用いられ、その用途から集積回路用導波路と長距離信号伝送用伝送路に大別される。前者の誘電体線路としてはイメージガイドやインシュラーイメージガイドなどがあり、後者のそれは光ファイバの基礎となる円柱状誘電体線路などがある。

本節では、集積回路用誘電体線路及び円柱状誘電体線路について述べる。

#### 3-3-1 集積回路用誘電体線路

代表的な集積回路用誘電体線路を図 3・6 に示す。図 (a) は接地導体上に誘電体ロッドを配置したものでイメージ線路と呼ばれる<sup>1)</sup>。この伝送損失は誘電体ロッド部の誘電体損と接地導体部の導体損失からなり、誘電体としてテフロンを用いた場合、50 GHz 帯で 2.3 dB/m (誘電体損失 0.9 dB/m : 導体損失 1.4 dB/m) と低損失な性能が得られている<sup>2)</sup>。この損失を更に低減するため、図 (b) に示すインシュラーイメージ線路が提案された<sup>1)</sup>。これは誘電体ロッドと接地導体の間に低誘電率誘電体基板を挿入して誘電体ロッド部の電磁界を接地導体から離すことにより導体損失を低減しようとするものである。これらの誘電体線路はミリ波集積回路用導波路として提案されたものであるが、回路の不連続などで発生する不要放射波の問題などを考慮すると、ミリ波よりむしろ波長が短い光波帯に適した導波路といえる。

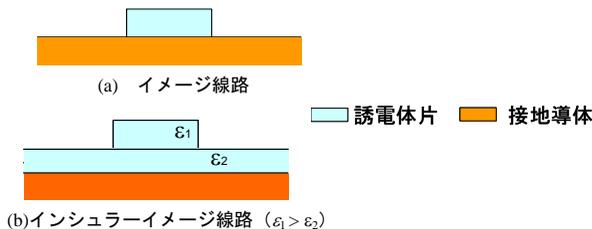


図 3・6 代表的な誘電体線路

#### 3-3-2 円柱状誘電体線路<sup>3)</sup>

誘電体ロッドの断面を円形にした場合、長尺にわたって精度よく円柱状の誘電体線路が作成できる利点がある。このような円柱状誘電体線路の形状を図 3・7 に示す。伝送波は  $HE_{11}$  モードと呼ばれる混成波であり、これは長距離大容量信号伝送線路として実績のある光ファ

イバの基礎を与えるものである。

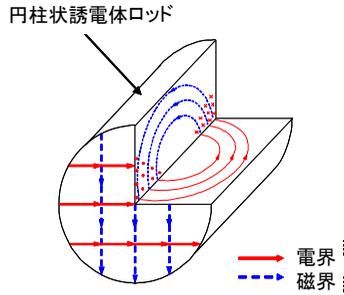


図 3・7 円柱状誘電体線路とその電磁界分布

#### ■参考文献

- 1) R. M. Knox, "Dielectric Waveguide Microwave Integrated Circuits ? An Overview," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-24, no.11, pp.806-814, 1976.
- 2) S. Shindo and T. Itanami, "Low-loss Rectangular Dielectric Image Line for Millimeter-wave Integrated Circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-26, no.10, pp.747-751, 1978.
- 3) R. E. Collin, "Field theory and guided waves," McGraw-Hill, 1960.

## ■9 群-7 編-3 章

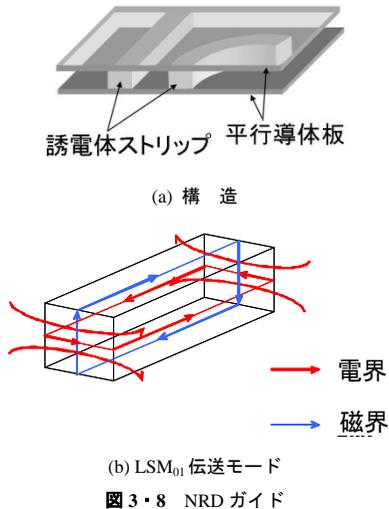
### 3-4 NRD ガイド

(執筆者：黒木太司) [2009 年 1 月 受領]

ミリ波帯における誘電体線路の伝送損失は、マイクロストリップ線路やコプレーナ線路などのプリント伝送線路と比べて著しく低損失であるが、線路の曲がりや不連続部で不要な放射波が発生する。NRD ガイド (Nonradiative Dielectric Waveguide) はこの問題を解決した誘電体線路であり、誘電体線路本来の低損失性を保持し、かつ回路の集積化に不可欠な非放射性を有したミリ波伝送線路である。

#### 3-4-1 NRD ガイドの原理<sup>1)</sup>

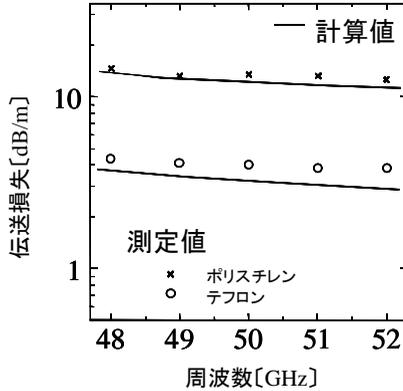
半波長以下の間隔で平行に置かれた 2 枚の導体板に平行に偏波した電磁波は遮断されて伝送できない。このような遮断平行平板導波管に図 3・8(a)のように誘電体ストリップを挿入すると、誘電体中では波長が短縮されるために遮断効果が解消され、ストリップに沿って電磁波が伝送する。しかも従来の誘電体線路に見られた曲がりや不連続部での不要放射波は、平行平板の遮断効果により抑制される。これが NRD ガイドの動作原理である。NRD ガイドの動作モードは図 3・8(b)のような、磁界が誘電体と空気の境界面に平行な LSM<sub>01</sub> モードである。



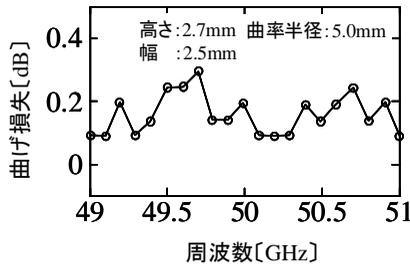
#### 3-4-2 NRD ガイドの低損失性<sup>2)</sup>

LSM<sub>01</sub> モードによる導体板上の高周波電流は、すべて横方向に分布しているので、その導体損は周波数の増加とともに減少するという、円形導波管における TE<sub>01</sub> モードの損失特性に類似している。したがって、低損失な誘電体材料で誘電体ストリップを構成すれば、NRD ガイドの低損失性は確保される。誘電体材料としてはミリ波で低損失なテフロンが採用され、導体板として銅を用いた場合、伝送損は 50 GHz で 4 dB/m になる。実用的には導体板に硬質

アルミを用いるが、この場合でも伝送損は 6 dB/m であり、プリント線路と比べて損失は格段に改善される。図 3・9(a)には導体板として銅を用い、誘電体材料としては比誘電率が 2.04、誘電正接が  $1.5 \times 10^{-4}$  のテフロン、及び比誘電率が 2.56、誘電正接が  $9 \times 10^{-4}$  のポリスチレンを用いた場合の伝送損の理論値と測定値を示すが、両者はよく一致している。また、図 3・9(b)は曲率半径 5 mm という急峻な 50 GHz 帯バンドの透過損であり、その値は 0.3 dB 以下と小さく、NRD ガイドでは曲がりや不連続で不要放射はないことが実証されている。



(a) 伝送損失の計算値と測定値



(b) 曲げ損失の測定値

図 3・9 NRD ガイドの伝送特性

#### ■参考文献

- 1) T. Yoneyama and S. Nishida, "Nonradiative Dielectric Waveguide for Millimeter-Wave Integrated Circuits," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol.MTT-29, no.11, pp.1188-1192, 1981.
- 2) 米山 務, "非放射性誘電体線路を用いたミリ波集積回路," 電子情報通信学会論文誌, vol.J73-C-1, no.3, pp.87-94, 1990.