

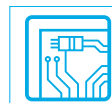
もう一度学ぶ電磁気学の世界



第21回

さまざまな伝送線路と導波管の電磁界

小暮裕明



ボードの記事



ビギナーズ

前回は配線路を伝わるエネルギーにこだわり、電気回路の電圧と電流による説明と、配線路の周りに分布する電界と磁界によるポインティング電力というもう一つの解釈を学びました。電力を管内に閉じ込めて運ぶ導波管伝送路にはカットオフという現象があり、また位相速度は光速を超え、自由空間の平行2線路とは異なる特性があることもわかりました。今回は導波管内の電磁界をさらに詳しく観察しながら、よく使われるさまざまな伝送線路との違いについて学びます。(筆者)

1. 導波管伝送路の特性

初めに、これまで本連載で扱ってきた代表的な伝送線路を、掲載順にp.68の表1にまとめておきましょう。

● 伝送線路の伝搬モード

伝搬モードは、伝送線路の形状によって決まる境界条件^{注1}のもとでマクスウェルの方程式(本誌2004年5月号, pp.131-138の連載第3回を参照)を解くことによって得られます。電磁界シミュレータはマクスウェルの方程式を用いた解析エンジン^{注2}により、これを離散(デジタル)的に解くことができます。

注1: 境界条件とは、2種類の媒質の境界面において電界と磁界に課する条件。

注2: ここでいうエンジンとは、動力の意味ではなく、特定の機能を提供するソフトウェアを指す。Webの検索エンジンも同様の意味。

注3: 数値解析とは、パラメータを含まず、数値を直接用いて近似的に解く解析手法。機械系で用いられる有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)は、電磁界解析の手法としても発展している。

交流理論や数値解析^{注3}では、一般にsin(正弦)波を扱いますが、同軸線路や導波管内ではsin波で表される複数の独立した伝搬モードが得られ、これらをモード番号の添え字を付けて表します。

表1では、平面波を除く伝送線路はすべて、金属導体のガイドを持っています。無損失導体では、導体表面に対して電界ベクトルは垂直に、磁界ベクトルは水平になるので、これらを境界条件として解くと、表1のような電磁界分布が得られます。導波管ではモード番号が増えるにつれて電磁界分布のパターンはより複雑になりますが⁽¹⁾、電界ベクトルと磁界ベクトルは、空間のどの位置でも直交していることに注意してください。

● TEM波伝送路の特性インピーダンス

電界と磁界の大きさがわかれば、もう一つの重要な要素である特性インピーダンスが得られます。この値を知るとは、線路に接続する負荷に対して整合をとるために重要な意味があります。

平面波では電波インピーダンスや固有インピーダンスとも呼ばれますが、電界 E と磁界 H の比 $|E|/|H|$ で求められ

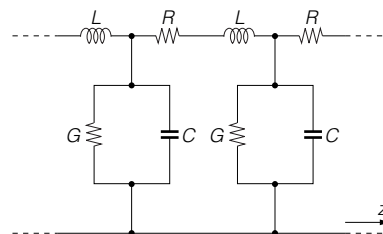


図1
TEM波伝送路の分布定数回路表現

R, L, G, C は単位長さ(1m)当たりの値を示す。これが線路に沿って広く分布する

Keyword

伝送線路, 導波管, 境界条件, 数値解析, TEM波伝送路, 特性インピーダンス, 平行2線路, マイクロストリップ線路, 自由空間, 同軸線路, 波動インピーダンス, 伝搬定数

表1
代表的な伝送線路

名称	伝搬モード	電磁界分布(青線:電界,赤線:磁界)	特性インピーダンス	本連載掲載回
平行2線路 (レッヘル線)	TEMモード		例: 300Ω(リボン・フィーダ) $Z_0 = 120 \ln\left(\frac{2d}{a}\right)$ a : 線径, d : 線間, \ln は自然対数	第2回, 第9回, 第20回
マイクロ ストリップ 線路	準TEM モード		例: 20 ~ 110Ω 近似的例: $Z_0 = 30 \ln\left[1 + \frac{4h}{W_0} \left\{1 + \frac{8h}{W_0} + \sqrt{\left(\frac{8h}{W_0}\right)^2 + \pi^2}\right\}\right]$ h : 誘電体厚 W_0 : 線幅(線厚ゼロの等価幅)	第2回, 第3回, 第9回, 第15回, 第16回, 第19回
自由空間 (平面波)	TEM波		377Ω(電波インピーダンス) $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377 [\Omega]$	第7回, 第15回, 第20回
同軸線路	TEM, TE_{mn} , TM_{mn}		例: 50 ~ 300Ω $Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right)$ a : 内導体径, b : 外導体径(TEMの場合)	第14回, 第15回, 第19回
導波管	TE_{mn} , TM_{mn}		例: 493Ω(方形導波管 WRJ-4 4GHz) $V_{BA} = -\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ 方形 TE_{10} の場合の 波動インピーダンス a : 長辺寸法 λ : 波長	第15回, 第20回

m, n は, モード番号と呼ばれる0から始まる整数. 同軸線路, 導波管は, 代表的なモードを示している

ます. 平行2線路や同軸線路のようなTEMモードの場合も, 電磁界シミュレータで得られた電界 E と磁界 H の大きさから, その線路の特性インピーダンスがわかります.

一方, TEM波伝送路では, 図1のような分布定数回路表現(本誌2004年3月号, pp.115-122の連載第2回を参照)により, 線間の電圧 V と線路を流れる電流 I から, 特性インピーダンスは次の式で表されます(本誌2005年6月号, pp.133-140の連載第12回, および参考文献(2)を参照).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで R, L, G, C は単位長さ(1m)当たりの値を示しています. これらは図1で空間に分離されているように表現されていますが, 実際には線路に沿って広く分布しているわけです.

線路に損失がない場合は R と G をゼロとして, 式(1)は次のようになります.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(2)$$

式(2)は実数になるので, 特性抵抗と呼ぶこともあります. 式(2)により線路の特性インピーダンスを求める方法もあります. 例えば内導体径 a , 外導体径 b の無損失導体を用いた中空パイプ状の同軸線路を考えると, 単位長さ当たりの C と L は次の式で求められます⁽³⁾.

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \dots\dots\dots(3)$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \dots\dots\dots(4)$$

そこで, 式(3)と式(4)を式(2)に代入して得られる Z_0 は, 表1に示した式の μ を μ_0 に, ϵ を ϵ_0 にしたものになります.

ところで, 同軸線路は基本モード^{注4}であるTEMモードで使いますが, 表1に示すように高次モードも伝送します. これを避けるためには, それぞれのモードのカットオフ(遮断)波長 λ_c よりも長い波長の電磁波を使う必要があります.

注4: 基本モード(dominant mode)とは, もっとも低い周波数から伝搬するモード. 導波管では遮断波長のもっとも長いモード.