

|             |                                                        |
|-------------|--------------------------------------------------------|
| 氏 名         | 矢 部 初 男                                                |
| 授 与 学 位     | 工 学 博 士                                                |
| 学位授与年月日     | 昭和 59 年 3 月 14 日                                       |
| 学位授与の根拠法規   | 学位規則第 5 条第 2 項                                         |
| 最 終 学 歴     | 昭和 35 年 3 月<br>電気通信大学電気通信学部電波通信学科卒業                    |
| 学 位 論 文 題 目 | 方形導波管ツイスト素子の設計法に関する研究                                  |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 虫明 康人 東北大学教授 西田 茂穂<br>東北大学教授 広池 和夫 東北大学教授 安達 三郎 |

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

方形導波管ツイスト素子は、偏波面を回転することのできる回路素子としてマイクロ波およびミリ波の導波管伝送路において古くから実用に供されている。しかしながら、これを設計するための資料は実験的あるいは経験的に与えられているに過ぎず、 $90^\circ$ ツイストに対して波長の2倍以上の管軸長があればVSWRが1.1以下におさえられる、という程度の基準が存在するのみであった。

その後、方形ツイスト導波管の伝送特性を電磁界理論の立場で解析する研究がLewinによって行われたが、管壁面の境界条件を近似し、管内電磁界がTEモードであるという仮定のもとで管内波長を求めたものであり、この結果をツイスト素子の設計資料として役立てるのに十分ではなかった。

本論文は、このツイスト構造における境界値問題を従来より以上に厳密に解析して、電磁界分布と伝送特性を明らかにすると共に、与えられた周波数帯域と許容し得るVSWRに対して、可能な限り短い管軸長をもって所要のツイスト角を実現することのできる設計法の確立を目的として研究を行ったものである。

### 第 2 章 ツイスト座標系

本章では、ツイスト構造の境界値問題をできるだけ自然、且つ簡潔に表現するために、ツイスト

座標系を導入し、一般曲線座標系の立場でその数学的性質を明らかにした。まず、この座標系の自然標構が局所的に斜交系を形成することを示し、これをベクトル基底として電磁界解析に必要なベクトル演算公式の具体的な表示式を導いた。そして、ベクトルの共変成分と反変成分との導入によって、ツイスト座標系におけるマクスウェルの方程式を、直角座標系の成分表示式と同様な簡潔な形式で表現し、本論文における電磁界解析の基礎を確立した。

### 第3章 螺旋面偏波電磁界

ツイスト座標系における電磁界の特徴を把握するために、本章では、自由空間中における螺旋面偏波電磁界の存在を理論的に考察した。まず、電磁界の満たすべきベクトル波動方程式を共変成分と反変成分とによって表し、座標軸のツイストに伴って偏波面が回転する電磁波を検討した結果、単一ツイスト座標成分だけの電界をもって伝搬する回転偏波電磁界は存在しないこと、TEM波として存在できるのは平面円偏波電磁界だけであることを明らかにした。又、互いに反対方向に進行する円偏波の合成によって、電界と磁界が平行となる電磁界が存在し得ることも確認した。更に、この座標系におけるヘルツベクトルの満たすべき方程式を具体的に導いて一般電磁界の表示式を得た。

### 第4章 方形ツイスト導波管内のハイブリッドモード電磁界

本章では、まず、ツイスト座標系を導入して、方形ツイスト導波管の壁面における境界条件の厳密な表示式を導いた。この境界条件によって、管内電磁界はTE波として存在することはできずハイブリッドモードを形式することを示すと共に、ベクトル波動方程式を摂動法によって解き、管内主モード電磁界の解析的表示式を求めた。

次にモード展開を行い、高次モード成分の中で最も大きな影響を与える直交偏波成分の呈する後進波特性を明らかにし、このモード電力が零となる周波数の存在を見出した。そして、この特定の周波数は、ツイストの程度に拘わらず導波管の断面寸法比だけに依存することを確認した。

更に、方形ツイスト導波管の極限構造としての平行板ツイスト線路における電磁界についても併せて考察し、ツイスト導波管断面の中央部における電磁界がプロペラ状等位相面によって近似し得ることを示した。

### 第5章 方形ツイスト導波管の分散特性

方形ツイスト導波管内を伝搬する主ハイブリッドモード電磁界の第一次摂動解に基づいて、その位相定数の第二次摂動解を求めた。そして、長辺  $a$ 、短辺  $b$  の方形断面をもつツイスト導波管の分散特性として次式を得た。

$$\beta_T = r_2 \sqrt{\left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{r_1 a}\right)^2}$$

但し、 $\beta_T$  は位相定数、 $f$  は周波数、 $c$  は光速、 $r_1$ 、 $r_2$  はツイスト角と断面寸法比によって定まる摂動係数である。ここで、 $r_1 = r_2 = 1$  とするとよく知られた直線導波管の分散公式に帰着

し、ツイスト角が増加すると  $r_1$  は減少し、 $r_2$  は増加する。このことは、ツイストの効果が等価的に断面を縮ませ、伝搬距離を長くしていることを意味し、遮断周波数の増加と管内波長の短縮という2つの相反する効果によって、ツイストの程度に拘わらず位相定数が一定に保たれる周波数が存在することを示している。

更に、本章では、電磁界のエネルギー関係式に基づいて平行板ツイスト線路における位相定数の計算式を求め、直線平行板線路のTEMモードでは、ツイストによって管内波長が短縮する効果だけが現れることを明らかにした。

## 第6章 方形ツイスト導波管の分散特性に関する実験および考察

本論文における理論解析結果の妥当性を実験によって検証するために、10GHz帯用の方形断面をもち、管軸長20cm、ツイスト角が最大540°に及ぶ一連のツイスト導波管を試作した。そして、供試導波管によって伝送形共振器を構成しその共振周波数の測定値から、前章の理論解析の段階で仮定した位相定数の摂動表示式の妥当性を確かめることができた。次に、NC加工と電鑄法による製造工程に起因して僅かに変形したツイスト導波管の断面を、等価的に方形とみなしてその寸法を評価することのできる関係式を導びいた。この関係式は、分散公式における摂動係数とツイスト角との理論的關係を含むので、ここで評価した等価的な断面寸法を構造上の実測寸法と比較することによってその妥当性を検証することができる。この方法を、本論文の理論と、従来のLewinの理論の両者に適用し、本論文による理論の方がより合理的な結果をもたらすことを明らかにした。

## 第7章 方形導波管ツイスト素子の反射特性とその最適設計

本章では、まず、直線導波管とツイスト導波管の接合部における高次モードの発生機構を解明し、反射係数および入力アドミタンスの解析的表示式を求めた。次に、方形導波管伝送路中に挿入されたツイスト素子に対して多重反射を考慮した総合的なVSWRの理論式を導き、特別に製作した一連のツイスト導波管に対する10GHz帯の実験によってその妥当性を確認した。実験結果の一例を理論値と比較して図1に示す。

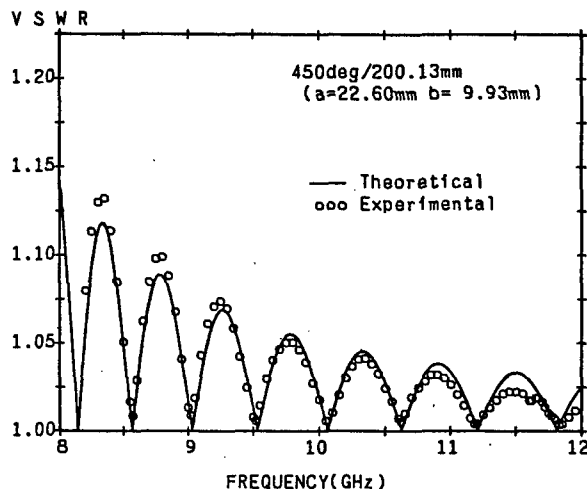


図1 試作ツイスト導波管に対するVSWRの理論値と実験値

以上の考察によって、ツイスト素子を含む方形導波管伝送路の広帯域低反射特性が明らかにされたので、本章では更に、実用的な立場でVSWRの最大値をおさえ、最適管軸長を実現し得る設計法について研究した。その結果は図2の設計図表に集約されており、設計条件として許容し得るVSWRの最大値と周波数帯域 $f_1 \sim f_2$ （直線管の遮断周波数 $f_c$ で正規化した値）を与える、導波管の断面寸法比 $(b/a)$ をパラメータとして90°ツイストの管軸長 $L$ が定まり、次いで、各周波数において生じ得る最大VSWR（共振現象が起こる場合、その最大値の包絡線）を読みとることができる。図2の例示（点線）では、 $f_1$ に対してVSWRを1.1におさえる場合の管軸長は $L = 1.9a$ であり、このとき $f_2$ におけるVSWRは1.03以下におさえられていることを示している。

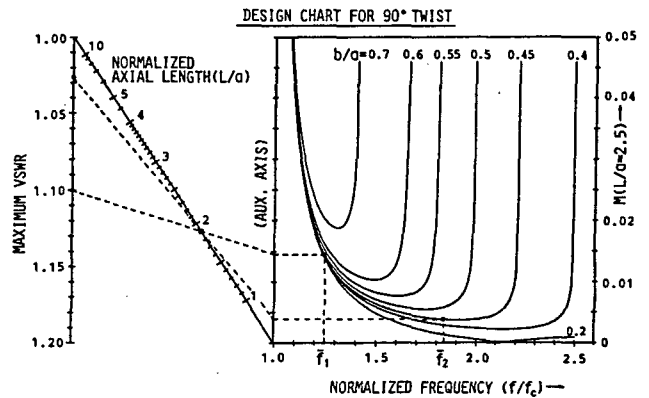


図2 方形導波管ツイストの設計図表

## 第8章 オーバーサイズ方形導波管のツイスト

本章では、方形導波管ツイスト素子を、高次モードが伝搬可能となる高域周波数帯において動作させる場合の設計基礎について理論的に検討した。まず、ツイスト素子を含む方形導波管において、主 $TE_{10}$ モードと、直交偏波 $TE_{01}$ モードだけが伝搬可能となるような軽度なオーバーサイズ条件のもとで総合的なVSWRの理論式を求めた。その結果、高次モードの遮断周波数を除いて広帯域低反射特性を示すことが確かめられ、前章で提示した設計図表がオーバーサイズ領域にまで拡張できることを明らかにした。

次に、方形導波管の主 $TE_{10}$ モードの伝送電力が、ツイスト管との接合面における高次モードの発生によって、周波数の増加と共に減少することを明らかにし、ツイストの限界ともいべき伝送電力半減周波数の概算式を示した。

## 第9章 結 言

本論文では、ツイスト構造に対する境界値問題を電磁界理論の立場で厳密に解析し、その伝送特性を解明すると共に、方形導波管ツイスト素子の広帯域低反射特性に着目した設計法についての研究結果を述べた。

本論文の主目的である設計法は、第7章において90°ツイストの設計図表に集約され、更に実用的な導波管に対して管軸長の決定にそのまま役立つ形で展開されている。この研究成果によって、従来に例をみないような短い管軸長をもつツイスト素子の最適設計が可能となった。

## 審査結果の要旨

方形導波管によるマイクロ波回路においては、偏波の方向を変換するため、ツイスト導波管素子がしばしば使用されている。この素子は、十分ゆるやかにひねったものを使用すれば特に問題がなかったため、これに関する根本的な研究はなされていなかった。

著者は、マイクロ波回路の小形化にも関連してツイスト素子の研究を取り上げ、ツイスト座標系における電磁界の表示式に関する基礎的研究から出発して、理論と実験の両面からツイスト素子の諸特性の詳細を明らかにし、その最適設計法を導いた。本論文はこれらの研究成果をまとめたもので、全文9章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、ツイスト構造の解析に適したツイスト座標系の検討を行ない、これを利用する立場から種々の関係式と表示式を導びき、それらを整理している。

第3章では、ツイスト座標系に沿って偏波面が回転するような種々の電磁界の存在性について考察することにより、ツイスト導波管内に存在し得る電磁界に対する予備的検討を行なっている。

第4章では、方形ツイスト導波管内の電磁界に対する境界条件の厳密な式を導びいた後、その電磁界を、直線導波管の各モードをひねった形の電磁界の級数和で表わす方法を与え、各高次モードの大きさを求めている。この結果は、初めて求められた正確な解として、今後の基準となるもので、優れた成果である。

第5章では、前章の解に基づいて導波管の分散特性を吟味し、方形導波管をひねった場合には、その横幅と長さがそれぞれある係数で比例的に変化したのと等価であると考え得ることを明らかにしている。また、その係数を使って、管内波長、遮断波長などを求め、数多くの設計資料を与えている。

第6章では、6～13 GHz帯での試作実験の結果を述べ、著者の理論が従来のものより優れていることを示している。

第7章では、方形導波管伝送路にツイスト素子が挿入された場合の反射特性について検討した後、反射波を許容レベル以下に抑えて、素子長を最小とする最適設計法を創案し、有用な設計チャートを導いている。

第8章では、オーバーサイズ導波管の場合について、前章の結果と拡張と問題点の指摘を行ない、本研究の価値を高めている。

第9章は結言である。

以上要するに、本論文は、ツイスト座標系の諸関係式の導出、ツイスト導波管内の電磁界とその分散特性の解明、試作実験による確認、ツイスト導波管素子の最適設計法の創案などにより、新しい知見と設計資料を与えたもので、通信工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。