

CNCフライスを用いた教材用平面導波路の製作におけるエンドミルの影響

一条 洋和, 保科 紳一郎

1. はじめに

近年、移動体通信の普及により高周波技術が急速に発達している。このような中で、高周波回路設計の低コスト化の一方法として、基板上の導体で構成する「平面導波路」が用いられている。平面導波路は、電気を学ぶ学生が一般的に用いるような電子回路用の基板からも容易に作る事ができ、高周波技術を学ぶ上で効果的な教材とすることができる。図1に、教材として本校専攻科の講義において作成された平面導波路（マイクロストリップ線路）を示す。

本校ではこれまでエッチング法によって平面導波路を製作してきた。しかしこの方法は、製作環境や経験によって回路の出来具合が変化したり、使用した薬品の後始末に手間がかかったりと、教材として向いていない部分もある。そこで、より教材向けの平面導波路の製作手法として、CNCフライスを用いる切削法について検討した。

この方法は、表面の銅箔を切削して回路を製作する方法であり、切削の際に絶縁体も削ってしまう場合があるため、設計した寸法との差異が生じる可能性がある。この差異による電気特性の変化が、他の回路要素の許容誤差と同程度に小さければ、高周波回路の教材として十分利用可能であると考えられる。本研究では、切削状況に大きく影響するエンドミルに着目し、その種類や切削条件による平面導波路の特性変化を測定した。



図1 製作した平面導波路

2. 平面導波路の特性測定方法

2. 1 平面導波路

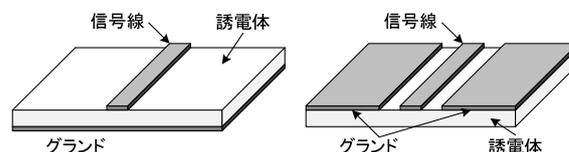
電子回路用基板で容易に製作できる平面導波路には、大きく分けて2種類ある。マイクロストリップ線路とコプレーナ線路である。これらを図2に示す。

エッチング法によりこれらの線路を製作する場合、銅の除去面積が広いほどエッチング液の劣化が早くなるが、製作時間はさほど変化しない。一方、切削法による場合は先端が細いエンドミルで銅を削っていくため、銅の除去面積に比例して製作時間が長くなる。本研究では、銅の除去面積が小さく、切削法において短時間で製作できるコプレーナ線路を測定の対象とした。

2. 2 線路の製作方法・測定方法

線路の設計には、CadSoft社製PCB CAD「EAGLE 5.6.0」を用いた。設計したものをCNCフライスに出力するコードへ変換し、切削を行った。EAGLE出力からCNCフライスまでの流れを図3に示す。

「ORIMIN PCB」および「USBCNC」は、本研究で使用したCNCフライスの製造元であるORIGINALMIND社製のソフトウェアであり、これらのソフトウェアによりコード変換およびCNCフライスの制御を行った。



(a) マイクロストリップ (b) コプレーナ

図2 平面導波路の種類

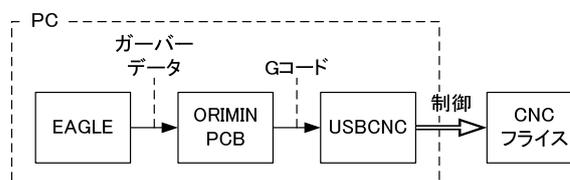


図3 線路の製作の流れ

製作した線路の特性測定には、ネットワークアナライザを用いた。また、線路とネットワークアナライザの接続にははんだづけ不要のコネクタ（ヨコオ社製、プローブコネクタSMA）を利用した。

ここまで示した製作方法・測定方法を用いてコプレーナ線路を製作し、(1)切削法による製作結果のばらつき、(2)エンドミル先端の形状による特性変化、(3)切削深さによる特性変化、(4)刃の摩耗による特性変化、以上4項目について線路の電気特性を測定した。

3. 平面導波路の特性測定結果

3. 1 切削法による製作結果のばらつき

図4に示すような、線路端がショートされている同一形状のコプレーナ線路を10枚製作し、その結果から切削法によるばらつきについて検討した。製作した線路を図5に示す。

図4の線路について、図中の入力端から線路側を見た入力インピーダンスを、50MHzから10GHzの範囲で測定した。測定結果を図6および図7に示す。

図6・図7共に、10本の特性グラフがほぼ重なっていることが確認できる。このことから、切削法において同じ線路を繰り返し製作した場合、ばらつきはほとんど現れないことがわかる。特性の再現性が高いという面では教材利用に適していると考えられる。

また、図6を見ると、全ての線路において2つの周波数でインピーダンスの抵抗成分が極大値を示していることが確認できる。同じ周波数において図7ではインピーダンスのリアクタンス分が誘導性から容量性に切り替わっていることが確認できる。製作した線路はこの2つの周波数で並列共振状態となっていると考えられる。先端が短絡された線路が並列共振

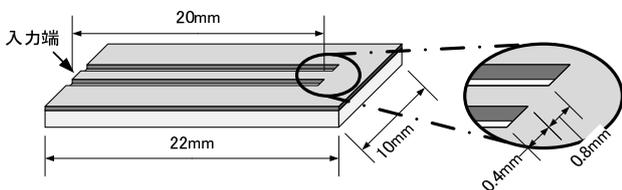


図4 製作した線路の寸法

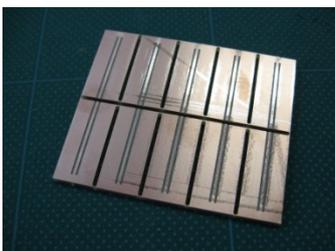


図5 製作した線路

状態となるのは、線路長 l [m] と線路上の信号波長 λ [m] が、以下の(1)式を満たすときである。

$$l = \frac{1 + 2n}{4} \lambda \quad (n : 0以上の整数) \quad (1)$$

(1)式より、並列共振周波数における信号波長が、製作線路の線路長に対応することがわかる。このため、切削法による線路寸法のばらつきは、並列共振状態となる周波数の違いに現れてくる。ばらつきの大きさを明確にするため、製作線路において、2つの共振点での共振周波数をグラフから求めた。図8は、第1共振点付近のグラフを拡大したものである。共振周波数の測定結果を表1に示す。

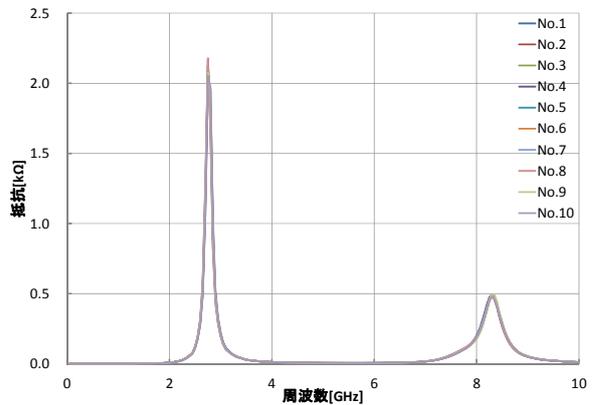


図6 製作線路の抵抗特性

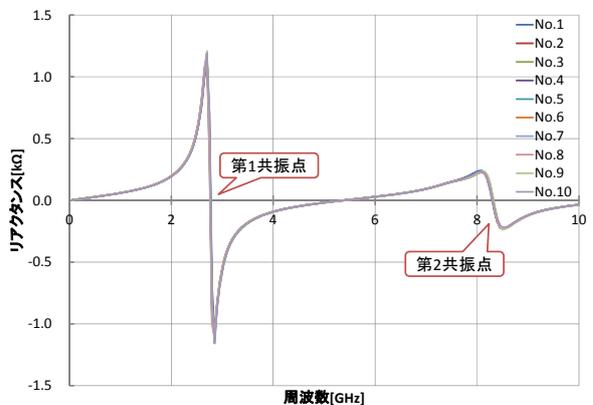


図7 製作線路のリアクタンス特性

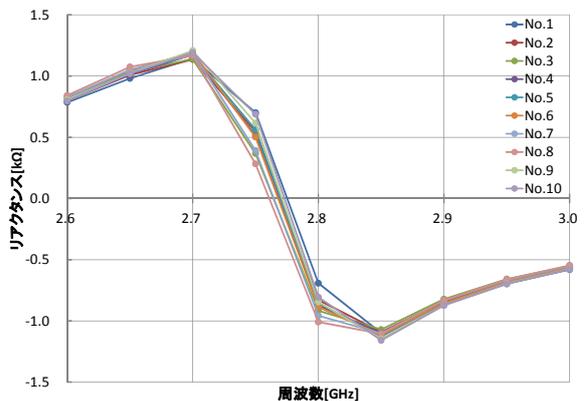


図8 製作線路の第1共振点

表1より、製作線路の共振周波数のばらつきは、第1共振点において±0.01GHz (0.36%)、第2共振点において±0.02GHz (0.24%) に収まっていることがわかる。設計した線路長が20mmであることを考慮すれば、切削法により同一線路を繰り返し製作する際の寸法のばらつきは、非常に小さいと言える。このことから、教材としての有効性が確認できる。

3. 2 エンドミル先端の形状による特性変化

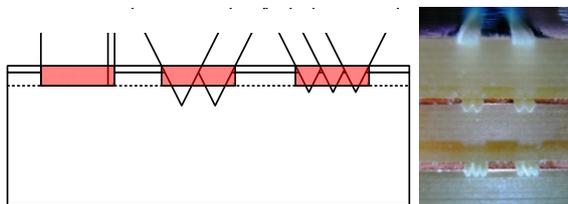
図9(a)に示すように、切削法に用いるエンドミルの先端形状により、誘電体の削られ方また切削量は異なってくる。同一設計の線路を、表2に示す2種類のエンドミルを用い、図9(a)に示す3パターンの削り方で製作した。線路寸法は、図4の寸法から線路の溝幅を0.4mmから0.55mmとした。製作した線路の断面写真を図9(b)に示す。また、共振周波数の測定結果を表3に示す。

表1 製作線路の共振周波数

線路No.	第1共振周波数[GHz]	第2共振周波数[GHz]
1	2.78	8.30
2	2.77	8.31
3	2.76	8.31
4	2.77	8.31
5	2.77	8.32
6	2.77	8.32
7	2.76	8.31
8	2.76	8.30
9	2.77	8.33
10	2.77	8.31
平均	2.77	8.31

表2 使用したエンドミルの種類

エンドミル	ドリル径	先端形状
ORIGINALMIND 土佐昌典FT	0.5mm	フラット
ORIGINALMIND 土佐昌典VC	0.8mm	V字(先端角53°)



(a) イメージ図 (b) 実際の切断面

図9 エンドミル形状による切削面の違い

表3 エンドミルが異なる線路の共振周波数

エンドミル	第1共振周波数[GHz]	第2共振周波数[GHz]
FT	2.78	8.33
VC(2本溝)	2.73	8.22
VC(3本溝)	2.74	8.18

表3より、フラットタイプのFTを用いる方が、V字タイプのVCを用いるよりも共振周波数が高いことがわかる。これは線路長が短いことと等価である。FTを用いる方が周波数が高くなった理由としては、切削面におけるエンドミル径がFTは大きく、線路とグランドをショートする部分において溝が丸みを帯び、実質的な線路長が短くなったことが考えられる。

また、FTを用いた時とVCを用いた時との共振周波数の差は、同一線路を製作した場合のばらつきの5倍程度になっている。このことから、実際の製作時には、いずれかのエンドミルで統一する必要があることがわかる。

3. 3 切削深さによる特性変化

電子回路用の基板には、製品ごとに異なる反りが生じることがあり、その反りのために切削深さが変化する。反りの影響を明らかにするため、切削深さを意図的に変化させ、線路特性の変化を測定した。線路寸法は、図4の寸法から線路の溝幅を0.4mmから0.55mmとし、さらに溝の切削深さを最大0.60mmまで変化させた。このときの共振周波数の測定結果を表4および図10に示す。

この結果から、エンドミルの種類を変えた場合に比べ顕著な変化が出ていることが確認できる。傾向としては、切削深さが大きくなるほど共振周波数が高くなっている。これは、導波路中の空気の割合が高くなることで、見かけ上の比誘電率が下がり、電波の伝搬速度が上がるため、線路上の実効波長が長くなった結果であると考えられる。数値的に見ると、切削深さ0.1mmに対して1%以上の共振周波数の変化が見られる。電子回路用の基板で0.1mmの反りというのは十分にあり得る数値であるため、平面導波路を切削法で製作する上では、CNCフライス側に切削深さを一定に保つ機構が必要であることがわかる。

表4 切削深さが異なる線路の共振周波数

切削深さ[mm]	第1共振周波数[GHz]	第2共振周波数[GHz]
0.15	2.72	8.22
0.30	2.87	8.61
0.45	2.95	8.82
0.60	3.02	9.00

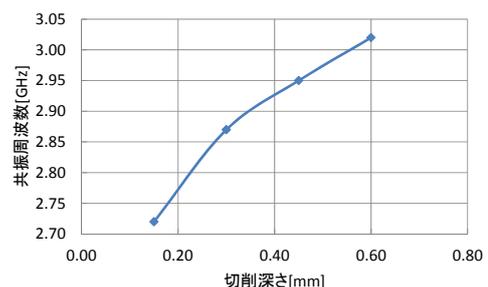


図10 切削深さに対する第1共振周波数の特性

3. 4 刃の摩耗による特性変化

先端形状がV字型になっているエンドミルの場合、切削を繰り返すと先端が摩耗し、製作した線路の寸法と設計値との間に差異が生じる可能性がある。そこで、図4に示す線路よりも長いものを連続して製作し、刃の摩耗による特性変化を測定した。線路の寸法および切削データを表5に示す。

表5で設計項目として挙げられている切削距離とは、刃が実際に基板を削る距離であり、エンドミルの仕様によれば切削距離50mmが刃の寿命の目安とされている。表5の設計によって線路を製作した場合、寿命の約15分の1を消費することとなり、複数製作することにより摩耗の影響を検討できると考えた。5枚連続で製作したときのリアクタンス特性の測定結果を図11に示す。

図11より、線路長が長くなったために共振点が数多く現れていることが確認できる。これは高周波の理論と合致する結果である。一方、1枚目の特性のみ他の4枚と大きく異なっていることも確認できる。この結果についても共振周波数を幾つか調べて検討する。結果を表6に示す。

表5 刃の摩耗を考慮するための線路の設計

設計項目	値
導体幅	0.80mm
溝幅	0.40mm
切削深さ	0.25mm
線路長	100mm
終端	ショート
切削距離	2853mm

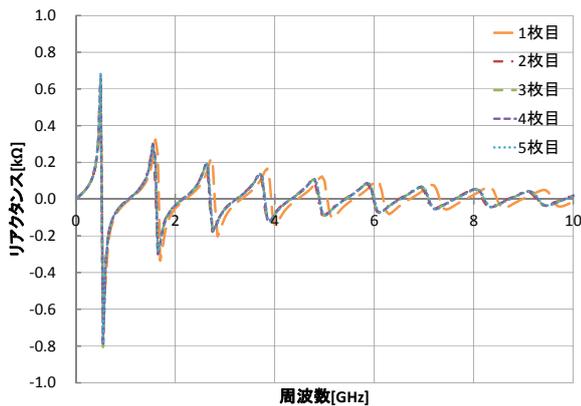


図11 100mmの線路の周波数特性

表6 100mmの線路の共振周波数

線路	第5共振周波数 [GHz]	第6共振周波数 [GHz]	第7共振周波数 [GHz]
1枚目	5.06	6.18	7.32
2枚目	4.87	5.97	7.06
3枚目	4.89	5.99	7.09
4枚目	4.89	5.99	7.09
5枚目	4.91	6.01	7.11

この結果から、1枚目のみ他と比べて共振周波数が高くなっていることがわかる。これは新品で切削した1枚目のみエンドミルの先端が鋭くなっており、切削量が他と比較してわずかながら多くなり、切削深さが大きいときと同等の効果が得られたからであると考えられる。2枚目以降については、枚数を重ねるほど共振周波数が高いという傾向が見られる。刃の摩耗が進めば切削量は減り、共振周波数は低くなるため、この傾向には別の理由があると考えられる。

この点で想定される1つの理由として、熱膨張の影響について述べる。切削法により高周波線路を製作する場合、エンドミルの径が細いため回転数を高くする必要がある。そのためエンドミルと加工物との摩擦によって熱が発生する。このとき金属であるエンドミルの方が熱伝導率が高いため、熱はCNCフライス側へ優先的に伝わり、結果としてエンドミル周辺が膨張すると考えられる。固体であるので熱膨張率は低い、高周波線路においては微小な寸法変化が特性に影響を与えるため、十分な理由付けになると考えられる。

以上の点から、新品のエンドミルを使う際には慣らし切削を行う必要があることがわかる。また、熱膨張の影響が考えられるので、連続して線路の製作を行う場合は、エンドミルの冷却に時間を取る必要があることもわかる。

4. 結論

CNCフライスによる切削法において、エンドミルの条件が線路の電気的特性にどのような影響を及ぼすかを検討した。線路の並列共振周波数に着目し、切削法によるばらつきを定量化し、切削法が高い再現性を実現できることが確認できた。また、切削条件による特性変化を明確化し、切断面や刃の摩耗による影響は実用上ほとんどないことが分かった。切削深さによる影響は無視できないが、適切な工作機械を用いることで問題を回避可能であることも分かった。以上から、教材用平面導波路を製作する方法として切削法が有効であることを示すことができた。

謝辞

本研究はJSPS科研費25918004の助成を受けたものです。