

高周波用低損失基板材料に関する可能性試験

倉橋真司 重松博之 加藤秀教 城谷泰弘*

The possibility test about the low-loss substrate material for the high frequency

KURAHASHI Shinji, SHIGEMATSU Hiroyuki, KATO Hidenori and SHIROTANI Yasuhiro

情報電子関連機器では、より高速化が求められ使用される周波数帯域もマイクロ波・ミリ波帯域へと高周波帯域の利用が進んできており、優れた高周波伝送特性と低誘電特性を併せ持つプリプレグ基板用材料が求められている。しかし、現状ではミリ波帯域での誘電特性の評価が行われていない。

そこで、誘電体レンズを用いたフリースペース法による測定評価を行い、プリプレグ基板の高周波帯域での誘電特性を把握した。また、基板を構成する基材として、液晶ポリマー不織布が基板の低誘電率化、低損失化に有効であることがわかった。

キーワード：ミリ波、基板材料、低損失、フリースペース法

はじめに

近年の通信情報量の急増に伴い、機器の小型化、高速化が強く望まれおり、これに対応できる低誘電性基板材料が要求されている。また、使用される周波数帯域もマイクロ波・ミリ波帯域へと高周波帯域の利用が進んできており、優れた高周波伝送特性と低誘電特性を併せ持つプリント基板材料が必要となっている。情報通信機器を構成する集積回路素子やフィルタなど機能性部品については、高周波特性そのものが製品の性能となるため厳密に測定されているが、プリント基板の絶縁層であるプリプレグ材の測定例は少ない。汎用プリプレグ材料であるガラスエポキシ樹脂などは、1 MHz での測定値が一般特性として紹介されているのみである。高周波帯域での基板材料の誘電特性評価法としては、導波管法¹⁾、共振器法²⁾が一般的であるが、導波管法や共振器法は測定試料の形状が測定誤差に大きな影響を及ぼすため、周波数帯域にあった共振器や導波管の大きさにあわせて試料を精度良く加工する必要があるなど問題点も多い。そこで、測定試料に対する制約が少なく、同一の板状試料を用いて広い周波数範囲を連続的に測定できる誘電体レンズによるビーム収束型フリースペース法³⁾を用いた基板材料の誘電特性測定を行うとともに、他の測定法と比較検討を行った。また、高周波帯域で低損失な誘電特性を有するプリプレグ基板として、液晶ポリマー不織布を基材とした基板を試作し、誘電特性について検討した。

その結果、誘電体レンズによるビーム収束型フリースペース法でプリプレグ基板の誘電特性を評価可能で一般的なプリプレグ基板の高周波帯域での誘電特性を

把握がすることができた。また、試作した液晶ポリマー不織布基材が低誘電特性に有効であることや、湿度環境に対して誘電特性の評価を行ったので報告する。

実験方法

1. 測定系

図1に、測定系のブロック図を示す。本測定系はVNA(Vector Network Analyzer)から発信した電磁波を誘電体レンズアンテナから測定試料に送信し、透過波及び反射波をレンズアンテナで受信した後、VNAで透過量、反射量及び位相変化を測定し、その値を用いて計算により、複素比誘電率を求めた。

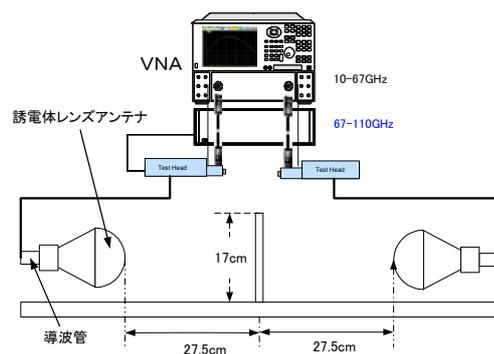


図1 測定系ブロック図

測定系の周波数範囲は、18-110GHz であるが、すべての周波数範囲を一度に測定することはできず、測定する周波数に対応した導波管⁵⁾に変更する必要がある。今回は、K~V-Band 帯 (18-110GHz) での測定を行い、試料サイズは 165mm×165mm、開口部 150×150mm のサンプルホルダーを用いて測定した。

*クラレ西条株式会社

この研究は、愛媛県東部エリア産学官連携促進事業「高周波用低損失基板材料に関する可能性試験」の予算で実施した。

2. 樹脂材料の誘電特性測定

表1に示す一般的な樹脂材料（PTFE, PMMA）と市販プリプレグ基板（G/E, A/E）及び、フレキシブル基板（PI）の各サンプルを165×165mmに切り出し、水平／垂直方向の誘電特性を測定した。

表1 樹脂材料

試料	厚み(mm)
PTFE：フッ素樹脂	2.052
PMMA：アクリル	0.9982
PI：ポリイミド	0.1252
G/E：ガラスエポキシFR4	0.4692
A/E：アラミドエポキシ	0.4092

3. プリプレグ基板の温湿度環境下での誘電特性試験

プリプレグ基板に求められる性能としては、

- ① 高周波特性が優れている（比誘電率及び、誘電損失が小さいこと）
 - ② 耐湿性に優れている
 - ③ 耐熱性が高い
- などがある。

温度湿度条件下でのプリプレグ基板の誘電特性を測定するため、表2の条件にてサンプルを恒温恒湿装置に12時間さらした後に誘電特性を評価した。

表2 温湿度条件1

	温度	湿度
条件1	85°C	Dry
条件2	60°C	95%
条件3	85°C	Dry
条件4	85°C	85%
条件5	85°C	Dry

次に、吸湿性について評価するため表3に示す湿度条件下に12時間以上さらした後、各サンプルの誘電特性を測定し吸湿性との関連を評価した。

表3 湿度条件2

	温度	湿度
条件1	60°C	Dry
条件2	25°C	70%
条件3	25°C	85%
条件4	25°C	95%
条件5	PCT(121°C)	100%
条件6	60°C	Dry

4. プリプレグ基板の試作

市販プリプレグ基板の誘電特性の評価を行うには、基材及び、樹脂材料の詳細について不明であることからプリプレグを構成する基材の種類と誘電率及び、吸湿性を正確に評価できない。そこで、基材の仕様が明らかなアラミド繊維、ガラスクロス及び、液晶ポリマー不織布を用意して、同じエポキシ樹脂を用いてプリ

プレグ基板の試作を行った。試作したプリプレグ基板の概要を表4に示す。

表4 試作プリプレグ基板の概要

試料(基材/樹脂)	基材(mm)	厚み(mm)
BE：液晶ポリマー不織布/エポキシ	0.094	0.398
AE：アラミド繊維/エポキシ	0.061	0.373
GE：ガラスクロス/エポキシ	0.058	0.236

試作したプリプレグ基板を表3の条件で湿度試験を行い、各条件で誘電特性を評価した。

基材自体の誘電率を測定する方法として、フィルム状基板や薄膜の誘電特性測定が可能なスプリットポスト誘電体共振器(SPDR)⁴⁾を用いた測定を行った。

基板の誘電率測定の周波数 K-Band (18-26.5GHz) 帯から、測定周波数 20GHz の SPDR により測定を行った。測定用サンプルとして 30×70mm に切り出し、プリプレグ基板と同様な表3の条件で誘電特性を測定した。

5. PPE 樹脂による低誘電損失基板

プリプレグ基板用樹脂として、最も一般的なエポキシ樹脂を用いて基材種による誘電特性の評価を行ってきた。ここではエポキシ樹脂よりも低誘電特性でかつ、高TG(ガラス転移温度)、低吸水性などの特徴を有し高周波用基板樹脂として注目されている PPE (ポリフェニレンエーテル) 樹脂を用いたプリプレグ基板の誘電特性を評価した。

基材としては、液晶ポリマー不織布とガラスクロスによる2種類のプリプレグ基板

[B/PPE：(液晶ポリマー不織布/PPE樹脂)0.84mm]

[G/PPE：(ガラスクロス/PPE樹脂)0.83mm]

について表3の条件で誘電特性を測定した。

結果と考察

1. 樹脂材料の誘電特性

一般的な樹脂材料及び、市販されているプリプレグ材の誘電特性をフリースペース法で測定した結果を図2に示す。K/R/Q/V/W-Bnadの導波管を用いて、広範囲な誘電特性を評価した。

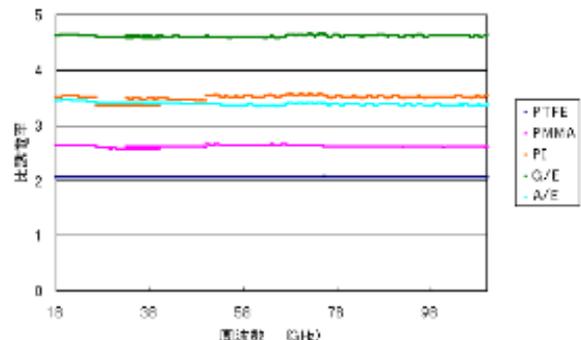


図2 樹脂材料の比誘電率（実部）

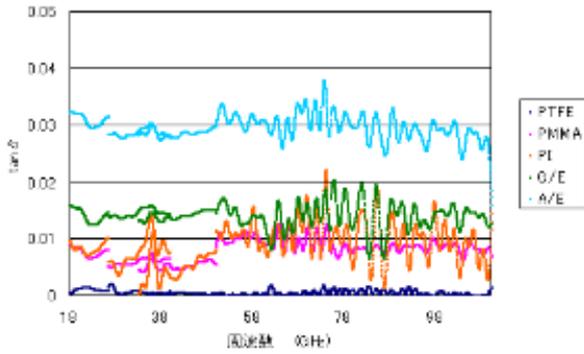


図3 樹脂材料の誘電損失

すべての材料で比誘電率の値は、周波数が異なっても一定の値となっている。また、誘電損失の値についても、60GHz以上の周波数においてデータのバラツキが認められるが、ほぼ一定の値となっている。ここでは、水平方向での測定結果のみを示しているが、垂直方法での測定値と一致した結果であった。

比誘電率については、ガラスエポキシ樹脂の値が最も大きく、ポリイミド、アラミドエポキシ樹脂、アクリル、フッ素系樹脂の順となった。また、誘電損失は、アラミドエポキシ樹脂の値が最も大きく、ガラスエポキシ樹脂、アクリル、ポリイミドの順で小さい値となり、フッ素系樹脂が最も誘電損失が小さい結果となった。

低損失材料の代表的な測定方法である遮断円筒導波管法⁵⁾での文献値と比較した結果を図4に示す。ここでは、文献値(□)と比較するために、上記のフッ素系樹脂、ポリイミドとともに、ポリカーボネイト(PC)をフリースペース法で測定した。図中には、K-Band帯での測定値の平均値(△)表示している。

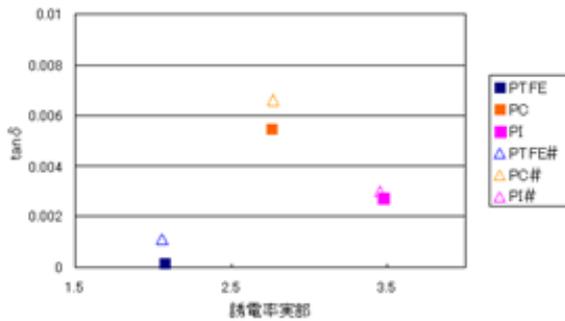


図4 他の測定法との比較

比誘電率の実部と誘電損失の値ともに、材料毎に同じ傾向を示している。特に実部の値については一致しており、誘電損失の値は、どの材料もフリースペース法の値が若干大きい値となっている。

最も低損失材料であるフッ素系樹脂の誘電損失値からで比較すると、フリースペース法では、0.001、導波管法では、0.00016となっており、フリースペース法での誘電損失値測定限界値が 10^{-3} であることがわかる。通常、低損失な基板材料を評価するには、十分な測定範囲であることから、フリースペース法により

従来の測定法と比較して簡単に低損失な材料を評価可能であることが確認できた。また、従来の測定法では困難であった高周波帯域において周波数に対する比誘電率を連続的に測定することができるため、比誘電率が可変する材料の評価などに利用できることがわかった。今回のプリプレグ基板比誘電率については、周波数が増加してもほぼ一定の値で変化していないことから、K-Band帯で評価することとした。

2. 温湿度環境下での誘電特性試験

表2の温度湿度条件下に12時間さらした市販プリプレグ基板(G/E、A/E)とフレキシブル基板(PI)の誘電特性の測定結果を図5、6に示す。図中の表示値は、K-Band帯測定周波数18-26.5GHz 801測定ポイントの平均値を表示し、比較のために低誘電かつ吸湿性に最も優れているフッ素系樹脂(PTFE)の測定値をあわせて示す。

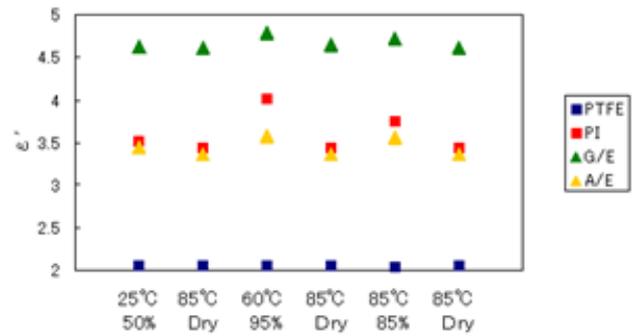


図5 温湿度条件による比誘電率変化(実部)

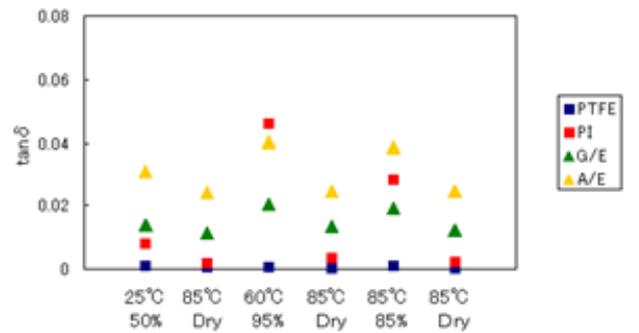


図6 温湿度条件による誘電損失変化

20°C湿度50%の条件では、樹脂材料の誘電率測定時とほぼ同じ値となっているが、温度湿度条件が変化するとフッ素樹脂以外のサンプルは、比誘電率実部、誘電損失値ともに変動し、[G/E] [A/E] [PI]の順番に変化量が増大していることが確認できた。また、湿度環境Dryの状態においては、各サンプルともに最小値となっていることから、比誘電率特性に、湿度環境(基板の吸湿性)が大きな影響を与えていることが容易に想像できる。そこで、表3に示す条件で湿度環境を変化させたときの各サンプルの誘電特性測定結果を図7、8に示す。

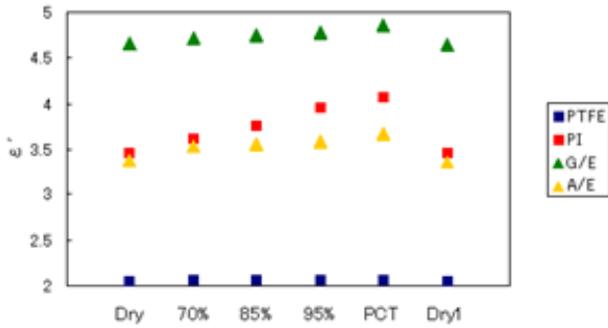


図7 湿度条件による比誘電率変化（実部）

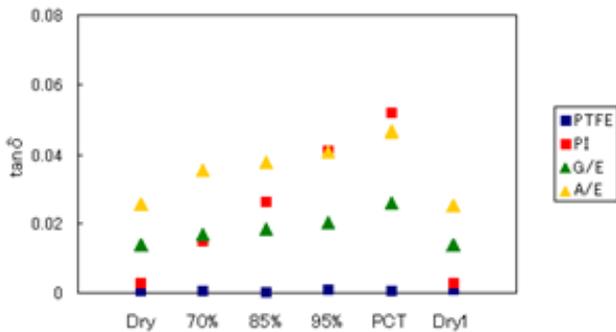


図8 湿度条件による誘電損失変化

フッ素系樹脂以外のサンプルは、高湿度になる毎に比誘電率実部、誘電損失ともに、増加していることがわかる。特に、[PI]については乾燥時と湿度時において変化量が最も多く、[A/E] [G/E] の順で変化量が小さくなっている。代表的な市販プリプレグ基材の誘電特性を把握することができた。

3. 試作プリプレグ基材の誘電特性評価

プリプレグ基材材料には、伝搬速度や伝送損失の点からは、より比誘電率実部が小さく、かつ誘電損失が小さく。また、より吸湿性（湿度環境下での誘電特性の安定性）が優れた基材が求められる。そこで、液晶ポリマー不織布を基材としたプリプレグ基材を試作し、液晶ポリマー不織布の基材としての可能性を評価することとした。市販プリプレグ基材サンプルは、基材及び、樹脂材料の詳細が不明なため、基材の違いだけによる誘電特性の差異を明らかにすることが困難であるため、同一樹脂（エポキシ）を用いて、基材種類の異なった表4に示すプリプレグ基材を試作し、表3の湿度条件より誘電特性を測定した結果を図9、10に示す。

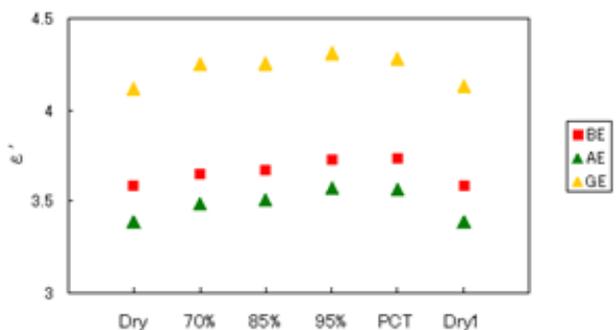


図9 試作基材の比誘電率変化（実部）

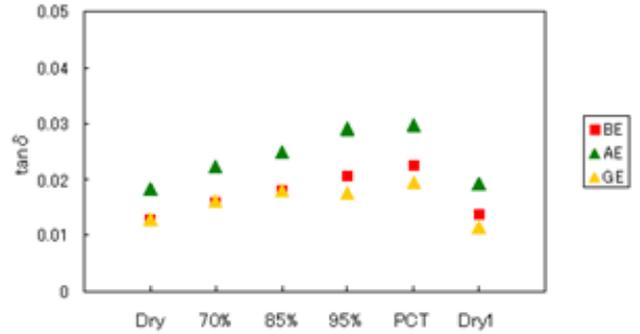


図10 試作基材の誘電損失変化

基材の種類により比誘電率実部及び、誘電損失値が異なった結果となった。比誘電率の実部の値は [GE] > [BE] > [AE]、誘電損失は [AE] > [BE] ≥ [GE] の順で小さくなっている。また、湿度条件に対しては、比誘電率実部については基材による特徴的な変化が認められず、また誘電損失は、アラミド繊維基材の変化量が最も大きく、市販基板と同じ傾向となった。

ここでの比誘電率の実部及び、誘電損失値については、基材の厚みや坪量が同一ではなく、また、エポキシ樹脂量についてもサンプル毎に樹脂量が異なっていることから、基材の違いによる正確な誘電率特性評価は困難であるが、液晶ポリマー不織布は、低誘電率でかつ吸湿性については、ガラスクロスと同等な性能であることがわかった。

液晶ポリマー不織布やガラスクロスは、低吸湿性に優れた材料であることから、湿度条件での変化についてはエポキシ樹脂の吸湿性を評価している可能性がある。そこで、基材自身（B：液晶ポリマー不織布 A：アラミド繊維 G：ガラスクロス）の誘電特性を SPDR 法で測定した結果を図11、12に示す。

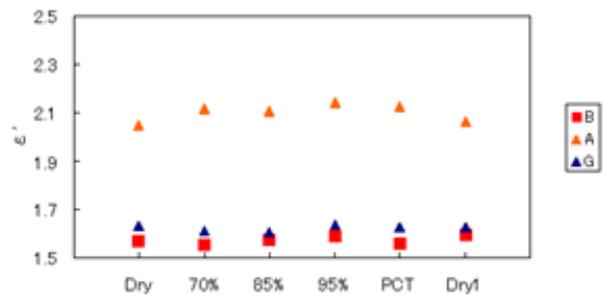


図11 基材の比誘電率変化（実部）

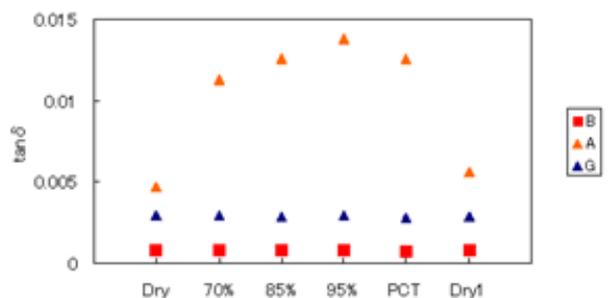


図12 基材の誘電損失変化

測定結果より、液晶ポリマー不織布とガラスクロス基材については、湿度条件が変化しても誘電特性に変化が無く、低吸湿性であることがわかる。アラミド繊維基材は、湿度条件と誘電特性値の変化が対応している。このことから、誘電特性の変化については、基材に含まれる水分が誘電特性に影響を与えていることが考えられ、アラミド繊維基材に吸湿性があることが確認できる。

基材の比誘電率実部の値については、 $[A] > [G] \geq [B]$ 誘電損失は、 $[A] > [G] > [B]$ の順番で小さい値となり、エポキシ樹脂でのプリプレグ基板での測定結果と異なった結果となった。このことから、エポキシ樹脂に吸湿性があること。また、試作プリプレグ基板毎に、基材厚みが異なること。かつ、エポキシ樹脂の量が同一でないことなどが影響していることがわかった。

基材の誘電特性は、液晶ポリマー不織布が最も低損失でかつ、吸湿性についても優れた基材であり、高周波用低損失基板の基材として適していることが確認できた。

しかし、低誘電率かつ低誘電損失なプリプレグ基板を開発するためには、プリプレグ基板を構成する基材とともに樹脂材料についても併せて検討する必要がある。

4. PPE 樹脂による低誘電損失基板の誘電特性試験

エポキシ樹脂よりも低誘電特性でかつ、低吸湿率などの特徴を有した高周波用基板樹脂として注目されている PPE 樹脂で作成したプリプレグ基板の誘電特性を評価した。基材には、液晶ポリマー不織布とガラスクロスの 2 種類とし、エポキシ樹脂と比較するために表 3 に示す湿度条件下に 12 時間さらした後に誘電特性を評価した結果を図 13、14 に示す。

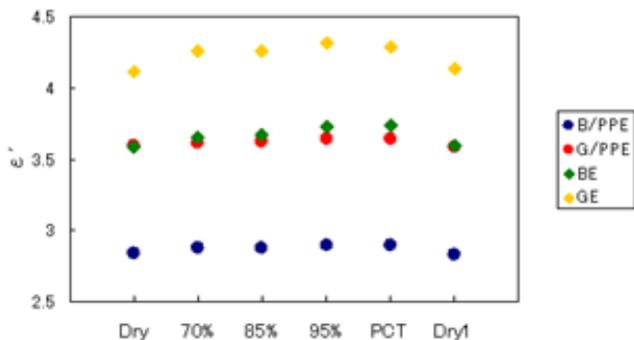


図 13 PPE/エポキシ樹脂比誘電率変化 (実部)

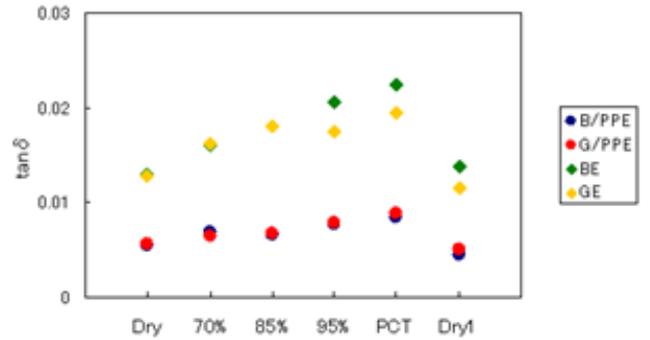


図 14 PPE/エポキシ樹脂誘電損失変化

樹脂の種類によって、比誘電率実部及び、誘電損失の値ともに異なった結果となった。比誘電率の実部の値は $[GE] > [G/PPE] = [BE] > [B/PPE]$ 、誘電損失は $[BE] \geq [GE] > [B/PPE] = [G/PPE]$ の順で小さくなっている。

湿度条件に対しては、比誘電率実部については特徴的な変化が認められず、誘電損失値は、樹脂の違いにより値は異なっているが、基材種類による差は殆ど認められない。このことは、液晶ポリマー不織布及び、ガラスクロス基材は、樹脂材料と比較してより低損失な材料であるため、樹脂材料の吸湿性を評価した結果となった。

PPE 樹脂とエポキシ樹脂による誘電特性を比較すると、比誘電率の実部については、ガラスクロス基材では 1.02 程度、液晶ポリマー不織布では 0.8 程度、PPE 樹脂を用いることで低誘電率となった。また、誘電損失の値は、基材種類に関係なく 0.01 程度小さい値となった。

このことから、プリプレグ基板の基材として液晶ポリマー不織布は、比誘電率の実部が小さく、かつ誘電損失についても低減を図る可能性のある基材材料であることが確認できた。また、湿度環境が変化しても誘電特性が一定であることから、吸湿性にも優れた基材材料であることもわかった。

液晶ポリマー不織布は、今後の高周波帯域に対応したプリプレグ基板に求められるより低誘電化、より低損失化、また、低吸湿性などの条件を十分に満たすことが可能な基材であることがわかった。

まとめ

高周波帯域で基板材料の誘電特性について誘電体レンズを用いたフリースペース法による測定評価法について検討するとともに、高周波帯域で低損失な誘電特性を有するプリプレグ基板として、液晶ポリマー不織布を基材とした基板を試作し、誘電特性について検討を行い以下の成果を得た。

- (1)市販プリプレグ基板を用いて誘電体レンズによるフリースペース法により K~V-Band [18-110GHz] における誘電特性を測定し、市販基板材料の高周波帯域での誘電特性を把握した。他の一般的な比誘電率測定法での測定値と比較検討を行い、ほぼ同じ傾向の結果を得ることができた。なお、フリースペース法での誘電損失測定限界値は、 10^{-3} であり、十分に基板の評価が可能であることがわかった。
 - (2)プリプレグ基板に求められる低誘電特性と耐湿性を評価するため、代表的な基板の湿度条件と誘電特性の関連を把握した。湿度環境により誘電特性が最も変化する基板は、ポリイミドであり、その後は、アラミド繊維/エポキシ樹脂、ガラスクロス/エポキシ樹脂の順番で変化量が小さくなった。
 - (3)プリプレグ基板を構成する基材用材料として、液晶ポリマー不織布の可能性を評価するために、一般的な基材材料であるガラスクロス及び、アラミド繊維の誘電特性を SPDR 法により評価した結果、液晶ポリマー不織布が最も低損失でかつ、耐湿性に優れた基材であり、高周波用低損失基板用基材として適していることが確認できた。
 - (4)エポキシ樹脂を用いて、液晶ポリマー不織布基材のプリプレグ基板を試作し、湿度条件による誘電特性を評価した。基材種類により、比誘電率実部の値に影響を与えること。誘電損失値は、基材よりもエポキシ樹脂の誘電損失が大きい、また、湿度条件に対してもエポキシ樹脂の吸湿性が影響して、基材の評価は困難であった。このことから、低誘電率かつ低誘電損失なプリプレグ基板開発のためには、プリプレグ基板を構成する基材とともに樹脂材料についてもあわせて検討することが重要であることがわかった。
 - (5)エポキシ樹脂よりも低誘電特性で低吸水性な PPE 樹脂と基材として液晶ポリマー不織布、ガラスクロスで構成されたプリプレグ基板の誘電特性を評価し、エポキシ樹脂と比較して、より低誘電率、低損失でかつ耐湿性にも優れた樹脂であることが確認できた。また、液晶ポリマー不織布は、ガラスクロス基材と比較して、比誘電率の実部が小さく、また、誘電損失と耐湿性については同等な性能であることから、今後の高周波帯域に対応したプリプレグ基板用の基材としての条件を十分に満たした基材用材料であることがわかった。
- 2)清水康敬, 杉浦行, 石野健:最新電磁波の吸収と遮蔽, 第2版, (日経技術図書), 518-531(1999).
 - 3)花澤理宏, 福永香, 渡部聡一, 山中幸雄, 橋本修: ミリ波帯における自由空間法を用いた液体の複素誘電率測定ム, 信学技法, EMC-J2004-11, 59-63(2004).
 - 4)戸高嘉彦: 1-20GHz 誘電体基板、フィルム、薄膜用 TE δ SPDR 誘電体共振器, マイクロウェーブ展セミナーテキスト(2006).

文 献

- 1)清水隆志, 小林禎夫: 遮断円筒導波管法によるミリ波複素誘電率の測定結果に関する検討, 信学技法, NW2001-137, 85-90(2001).