

次世代高速通信用基板向け低誘電ビニル樹脂の開発

Development of Low Dielectric Vinyl Resin for Next-generation High-speed Communication Circuit Boards

岩 下 新 一*
Shinichi IWASHITA

抄 録

第5世代(5G)通信における高周波化・高速化・大容量化といった機能要求の高度化に対し、高速通信用機器に用いられるリジッド銅張積層板向け材料には、低誘電損失である他、高多層基板化するための成型加工性や耐熱性を有するなど、多くの要求がある。特に低誘電損失化への要求は大きく、5G向け基板では誘電正接0.0015以下を満たす事が必要となる。これらの要求に対し、好適と考えられる可溶性の低誘電ビニル樹脂としてジビニルベンゼン樹脂(PDVB)を開発し、その誘電特性及び熱熔融特性を評価した。更にPDVBを他の基板向け樹脂と配合して銅張積層板を作成し、その物性評価を行った。

Abstract

In response to the increasing demand for high frequency, high speed, and large capacity in 5th generation communication systems (5G), materials for rigid copper clad laminate used in high-speed communication devices are required to have low dielectric loss, moldability for multi-layer boards, and heat resistance. There is a high demand for low dielectric loss, and 5G circuit boards must have a dielectric tangent of 0.0015 or less. In response to these requirements, a divinylbenzene resin (PDVB) was developed as a soluble low-dielectric vinyl resin that is considered to be suitable, and its dielectric properties and thermal melting properties were evaluated. Furthermore, we blended PDVB with other board resins to create copper-clad laminates and evaluated their physical properties.

1. 緒 言

人類の利便性・快適性の追求を駆動力として、情報通信技術は大きな進歩を遂げてきた。いつでもどこでも欲しい情報が得られるユビキタスネットワーク社会が現実のものとなり、インターネットを介して、大容量の情報が高速でやり取りされる社会が到来している。2010年頃から開始された第4世代(4G)通信(通信速度:~1Gbps(低速移動時))に加え、2022年頃から第5世代(5G)通信が本格的に運用開始されつつあり、IoT時代に対応した最大20Gbpsの超高速化が実現するなど、情報信号の伝達は超高周波化・高速化・大容量化が進んでいる^{1,3)}。

上記の情報通信機器に対する大容量化、高速伝送化、高速処理化などの要求に伴い、通信規格の世代が進むにつれ、信号周波数は高周波数化している。この高周波数信号が流れるプリント配線板では、種々の問題が発生する。具体的

には、伝送損失の増大によるプリント配線板の発熱や信号の減衰、遅延といった現象である。伝送損失には、伝送回路を形成する導体によって生じる導体損失と、絶縁体によって信号の電界エネルギーが消費されて起こる誘電損失がある。5G通信における情報通信機器、インフラでは、使用されるGHz領域での伝送損失を低減する事が求められるが、特に本周波領域では誘電損失の寄与が大きく、5G通信機器やインフラに用いられるプリント配線板では、絶縁体として誘電損失の低い材料が必要とされている^{2,6)}。

本稿では、この5G通信向けリジッド回路基板用材料として好適な、低誘電ビニル樹脂について述べる。

2. 本 論

2.1 リジッドCCLの構成と多層基板の製造方法

プリント配線板として用いられるリジッド基板は銅張積層板(Copper clad laminate, 以降CCLと略す)を回路加工

* 日鉄ケミカル&マテリアル(株) 総合研究所 機能樹脂材料開発センター 主任研究員 理学博士 千葉県袖ヶ浦市北袖11-5 〒299-0266

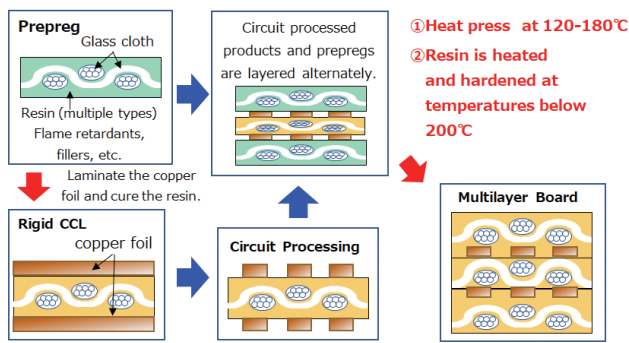


図1 リジッドCCLの構成と多層基板の加工工程
Rigid CCL structure and multi-layer board processing

した物である。このリジッドCCLの凡その構成と多層基板化の加工工程を図1に示す^{7,8)}。

まず、ガラスクロスに樹脂、難燃剤、フィラーの有機溶剤希釈品を含浸させて、その後溶剤を乾燥させてプリプレグを作成する。その両面、又は片面に銅箔を貼り合わせて熱プレス硬化した物がリジッドCCLである。熱硬化した有機・無機複合材料部分が誘電体部であり、銅箔部分が導体部となる。本稿で述べる可溶性ジビニルベンゼン系樹脂は、この誘電体として用いられる有機材料である。

この様にして得られたリジッドCCLを回路加工し、プリプレグと交互に積層した後、減圧下で熱プレス硬化して多層基板ができ上がる。この時、プリプレグは熱プレスされる事で熔融状態となり、回路の段差を充填可能な程度に流動する事が求められる。

2.2 高速通信用リジッド基板用材料に求められる性能

5G通信に用いられる高速通信用リジッドCCLへの主要な要求特性を列挙すると、1) 低誘電損失、2) 成型加工性、120–180°Cで熱熔融し、その後200°C以下の温度で熱硬化可能である事、3) 銅配線層との密着性、4) 低線膨張、特にZ方向(基板の厚み方向)への低線膨張、5) 難燃性、等がある。これらの要求特性に対し、1種類の材料で全要求性能を満足する事は難しく、複数種の材料を組み合わせた配合組成物として設計する場合が殆どである。上記要求特性に対し、有機系材料の多くの使用割合を占める主剤に対し、特に強く求められる機能は、1) の低誘電損失化及び2) 成型加工性である。特に1) の低誘電損失化への要求は強く^{4,6)}、5G通信に要求されるEthernet規格での通信速度：800GbE以上を実現するためには、リジッド基板での誘電正接(dissipation factor, 以降Dfと略す)0.0015以下を満たす必要がある、その構成成分である主剤においても同程度に低Dfである事が求められる^{3,4)}。

2.3 可溶性ジビニルベンゼン系樹脂

日鉄ケミカル&マテリアル(株)は、前述の要求性能の内、特に1), 2) の性能に優れる樹脂として、可溶性のジビニ

ルベンゼン樹脂(PDVB)の開発を行ってきた⁹⁻¹¹⁾。本樹脂はジビニルベンゼン(DVB)を原料モノマーとしており、その特徴として、①骨格が炭化水素のみから構成されるため極めて低誘電損失となり得る事、②芳香族骨格を有する事でリジッドCCLに用いられる有機材料類との相溶性が期待される事、③大部分が芳香族骨格であるため、耐熱性を有する事、④重合後も反応点としてビニル基を有する事から、熱硬化可能である事、⑤低分子量のオリゴマーとする事で熔融粘度を低くする事が可能、等が挙げられる。以下にPDVBの設計とその性能について詳述する。

2.3.1 低誘電損失化のための樹脂設計

まず、誘電損失の低減に関する基本的な考え方について示す。高周波電界中に誘電体を晒すと、外部の電界により誘電体内部の電荷が変位して偏りが生じる。これを誘電分極という。この誘電分極には、4つの種類があり、それぞれ電子分極、原子分極、双極子分極(配向分極)、界面分極である¹²⁾。誘電損失とは、誘電体が電場に晒された際に上記の誘電分極を生じ、電磁波のエネルギー損失を引き起こす事を言い、その損失は(1)式で与えられる¹³⁾。

$$\text{誘電損失} = f \times K_2 \times \sqrt{Dk} \times \tan \delta \quad (1)$$

ここで、 f : 周波数、 K_2 : 定数、 Dk : 誘電率、 $\tan \delta$: 誘電正接、である。本式から誘電損失は比誘電率及び誘電正接に依存しており、特に誘電正接の影響が大きい事が判る。図2に複素誘電率の実部(比誘電率 ϵ')と虚部(比誘電率 ϵ'')に対する周波数依存性の模式図を示す^{12,14)}。

図2を見ると、比誘電率と比誘電率共に、周波数によって依存性が異なる事が判る。これは周波数帯毎に電磁波を吸収し易い分極構造種が異なるためである。5G通信に使用される電気信号周波数領域(1~数十GHz)では、電子分極、原子分極の寄与は小さく、双極子分極の寄与が主体であり、本周波数帯領域で誘電損失を低減するには、双極子分極の寄与を小さくする事が有効である。

双極子分極とは、永久双極子が電界方向に向きを変える事によって発生する分極であり、そのモーメントは物質中の永久双極子のモーメントに依存する。永久双極子とは、外部電場又は外部磁場に関係なく存在する双極子であり、その構造中に元々電氣的偏りが存在するために生じている。従って、永久双極子の低減には分子構造中から電氣的な偏りを低減する事が有効と言える。

幾つかの重合性を有するモノマーの構造と双極子モーメントを表1に示す¹⁵⁾。表1を見ると、電気陰性度の大きい原子を分子内に持つメチルメタクリレートやアクリロニトリルに対し、スチレン、DVBやイソブチレンの様に、電気陰性度の大きく異なる原子を含まない炭化水素系の化合物の方が一桁程度双極子モーメントが小さくなっており、低誘電損失となる高分子材料の設計には、炭化水素系のモノマーが好適である。

これらのモノマーを重合すると、ビニル官能基は消失し、飽和炭化水素に変換される。スチレン及びイソブチレンの重合後の類似骨格であるエチルベンゼン及びイソブタンを比較すると、ビニル基の有無で双極子モーメントの大小関係が逆転しており、脂肪族炭化水素系のビニルモノマーの方がより低誘電損失となり得る事が判る。然しながら、脂肪族化合物は一般的に芳香族化合物と比較しガラス転移温度 (T_g) が低く、ビニル基の反応性が芳香族系ビニルモノマーと比較して低い事も踏まえると、高速通信向けのリジッド基板向けには芳香族ビニルモノマーの方が適していると考えられる。

又、単官能のビニルモノマーは重合時にビニル基が消失してしまい、生成する高分子中に反応性官能基が残らず、重合物は硬化能を有さない。前述した様に本用途では熱硬化可能である事が必須のため、二官能性モノマーを使用する必要がある。以上の理由から二官能性の芳香族ビニルモノマーである DVB を用いて、重合後もビニル官能基を有する重合物を得る事ができれば高速通信向け低誘電基板用

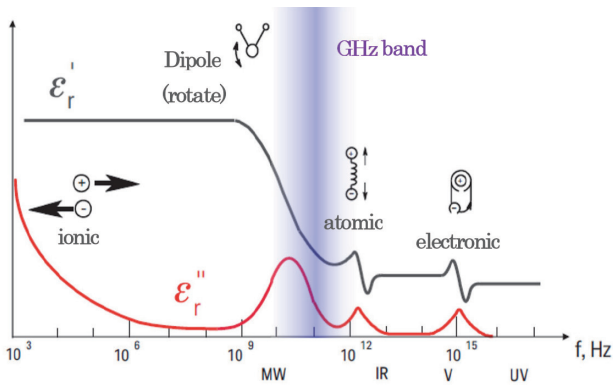


図 2 複素誘電率の周波数依存性模式図¹⁴⁾
Frequency dependence of complex permittivity¹⁴⁾

表 1 ビニル系モノマーの化学構造と双極子モーメント¹⁵⁾
Chemical structure and dipole moment of vinyl monomers¹⁵⁾

Monomer	Chemical Structure	Dipole Moments(D)
Styrene		0.123±0.003
Divinylbenzene		0.09
Isobutylene		0.503±0.010
Methyl methacrylate		1.67
Acrylonitrile		3.92±0.07
Ethylbenzene		0.59
Isobutane		0.132

の主材として好適な樹脂が得られると考えられる。

2.3.2 PDVB の合成例

PDVB は様々な方法での合成検討がなされているが、重合制御の難易度が高く、可溶性 PDVB についてのラボスケールでの成功例は幾つか報告があるものの¹⁶⁻²¹⁾、工業化例は日鉄ケミカル&マテリアルが初めてとなる。先行例について、幾つか例示すると共に、重合の技術課題について述べる。

DVB をモノマーとしてラジカル重合やアニオン重合を行うと、重合反応の初期段階において側鎖二重結合 (ペンダントビニル基) での分子間反応が進行し、3次元架橋体が形成され、最終的には高度に架橋した不溶物を与える事が知られている²²⁻²⁷⁾。この重合時の3次元架橋を如何に抑制するかが可溶性 PDVB 設計のカギとなる。可溶性 PDVB には二通りの合成例が報告されており、一つは鶴田ら^{16,17)}や石曾根ら²¹⁾によるアニオン重合での達成例である。本手法では、官能基が二つある状態でのビニル基と比較し、重合して一方が消費された状態のビニル基、即ちペンダントビニル基を反応させる事なく直鎖状の PDVB を得ており、これによりゲル化を防いでいる (図 3 (a))。

然しながら、本手法により作成された PDVB は貯蔵安定性が低く、極低温での保管でもポットライフが 2, 3 か月程度しかない事が併せて報告されている²¹⁾。一般にビニル基の重合速度は官能基の濃度に比例する事から、報告例の PDVB は DVB のみからなるため、ビニル官能基濃度が極めて高く、過剰である事が本現象の原因と推察する。又、本手法で合成した PDVB は数平均分子量 Mn が数万程度

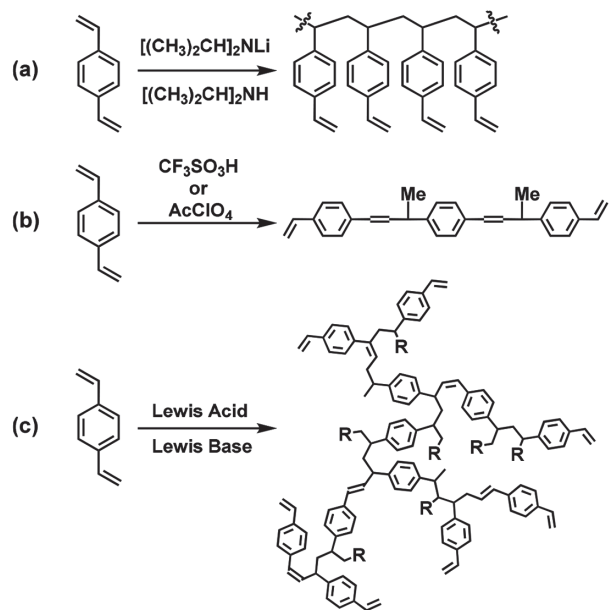


図 3 既報の可溶性 PDVB 模式図
Schematic diagram of previously reported soluble PDVB

あり、成型加工性の観点からは M_n が大き過ぎる。

もう一方は、オキソ酸触媒を使用したカチオン重合による例である(図3(b))^{19,20)}。本手法ではオキソ酸が開始剤として振舞うだけでなく、成長反応よりも速く活性末端近傍の β プロトンを引抜く事で、主鎖内部に多置換オレフィンを多く有する直鎖状の可溶性 PDVB を合成している。一般的に多置換オレフィンには反応性に乏しく、本構造において反応性官能基として作用するのは両端のペンダントビニル基のみとなる。

これに対し、日鉄ケミカル&マテリアルは DVB の反応性とペンダントビニル基の反応性を制御する事で、ペンダントビニル基を起点とした分岐鎖の成長反応を部分的に進行させ、適度にペンダントビニル基が消費された、オリゴマータイプの多分岐型 PDVB が合成可能である事を報告している(図3(c))⁹⁻¹¹⁾。本挙動は、①特定のルイス酸触媒及び溶媒の組合せにおいて、DVB と PDVB 中のペンダントビニル基の反応性に適度な選択性が生じている事、②第3成分として添加したルイス塩基性化合物が、活性点近傍において β プロトン脱離を引き起こして分子量の増大を抑制している事、の二つが同時に起きているため実現していると考えている。

2.3.3 多分岐型可溶性 PDVB の合成及び重合挙動

次に前項のコンセプトに基づいて図4記載の様に DVB 及びエチルビニルベンゼンとスチレンをモノマーとして重合反応を実施した。その結果について以下に述べる。

ルイス酸触媒と溶剤のみの組合せでは、重合開始10分程で M_n が数万を超える重合物を与え、且つ一部不溶性のゲルの発生が確認された。一方、同じルイス酸触媒と溶剤の組合せに対し、弱ルイス塩基性化合物を触媒に対して大過剰に加えた場合では、ゲル化物を与える事なく重合が進行した。重合時の分子量の変化をゲル浸透クロマトグラフィーにて追跡したチャートを図5に示す。

このチャートを見ると、重合初期から分子量2000付近に単峰のピークがあり、ピークトップの位置は重合終盤までほぼ動かず、連鎖移動又は反応停止までに成長反応を経て生成する PDVB の分子量はほぼ一定の分布である事が判る。一方、時間経過と共に前述のピークに対して高分子量の成分が生成しているが、これは生成した PDVB のペンダントビニル基を起点としてモノマー又は PDVB 分子が重合し、分岐が進行している事を示す。重合終盤で分子量の増大が加速しているのは、重合終盤で系中の PDVB 分子の濃度が高くなる一方で、モノマー濃度は低下する事から相対的に PDVB 同士の重合速度が大きくなるためである。

2.3.4 多分岐型可溶性 PDVB の性状

得られた重合物溶液をメタノールで再沈殿し、可溶性の白色固体を得た。得られた固体は転化率約50%時点のもの

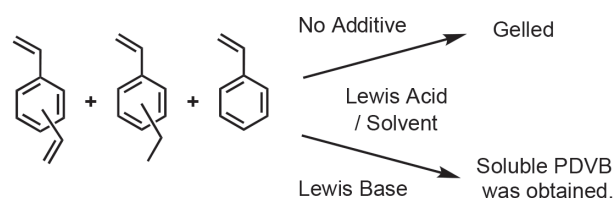


図4 ルイス塩基性化合物の有無による重合挙動の違い
Differences in polymerization behavior depending on the presence or absence of Lewis base compounds

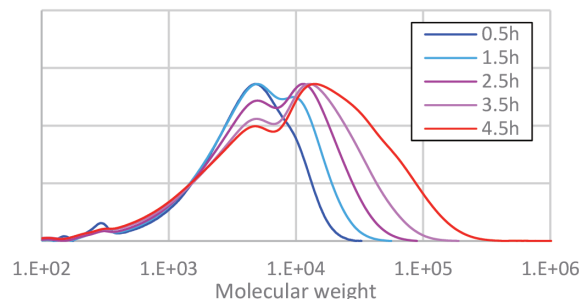


図5 PDVB 重合における分子量分布の経時変化
Changes in molecular weight distribution during PDVB polymerization

で M_n : 2570, 重量平均分子量 M_w : 34000 であり、比較的狭い分子量分布であった。又ヨウ素価測定により分子中のビニル基当量を求めたところ、390 g/eq. と一分子当たり6.6個のビニル基が存在する事を確認した。又プロトン NMR 解析により、5.0-5.3 及び 5.5-5.8 ppm にペンダントビニルに帰属されるピークが観測され、反応性官能基を有する事を確認した。実際に得られた PDVB に過酸化系開始剤 α, α' -Di(*t*-butylperoxy)-diisopropylbenzene を PDVB100 部に対し、外部数で1.0部加え 200°C × 120 分減圧下で、板状に加圧成型したところ、白色の成型板が得られた。本成型物の誘電特性を 18GHz の空洞共振法にて測定したところ、誘電率 D_k : 2.38, 誘電正接 D_f : 0.00128 であった。これは 4G 通信用の基板で採用実績があるとされる熱硬化性ポリフェニレンエーテル(以下 PPE)の D_f : 0.003 と比較すると非常に小さく、設計の通り優れた誘電特性を示す事が判った。

2.3.5 多分岐型可溶性 PDVB の温度 - 粘度挙動

図6に、レオメータを用いて昇温速度3°C/分、平行プレートを用いて測定した PDVB の温度 - 粘度曲線を示す。参照材料として、熱硬化性 PPE のデータも示している。熱硬化性 PPE は両末端のフェノール基をビニル官能基化したものである (M_n : 2400)。120°C より低温側のデータがないのは、120°C 以下では液化せず測定できなかった事による。この図を見ると、PDVB では温度の上昇と共に粘度が二桁以上低下し、140°C から急激に粘度上昇している事が判る。この粘度上昇は PDVB 中のペンダントビニル基同士が高温下で自己重合し、ゲル化が進行している事による。

一方、熱硬化性 PPE では、主鎖が直鎖状かつ主鎖自体の Tg が高い事から、硬化が開始する温度近辺での粘度の低下幅は PDVB と比較的小さい。更に昇温していくと、140℃以降では硬化反応が開始し、緩やかに粘度上昇する。両者における 140℃以降での粘度上昇の違いは、官能基密度の差に基づくと考えられる。PDVB は一分子中に 6 個以上のペンダントビニル基を持つのに対し、熱硬化性 PPE は両末端にのみビニル基を有する事からゲル化の速度は緩やかとなる。以上のデータから、成型加工時の流動性確保には PDVB の方が有利である事が示唆される一方で、PDVB の硬化速度は速く、積層板作成時のプレス圧及び加圧タイミングの制御などの詳細検討が必要となる。

2.4. PDVB の積層板評価

2.4.1 PDVB 積層板の作成条件

次に前述の通り得られた PDVB を用い、銅張積層板を作成し物性評価を実施した。併せて、他樹脂との配合組成物における積層板物性についても述べる。

前述の通り、PDVB はその多分岐構造、並びに主鎖芳香族骨格に起因して、種々のポリマーと良好な相溶性を示す。例えば前述した末端ビニル官能基化熱硬化性 PPE 等は非

常に良く相溶し、積層板に延性を付与するために用いられる事がある水添スチレン-ブタジエンゴム (HSBR) の様な高分子量の樹脂とも一定の相溶性を示す。特にスチレン含有率の高い HSBR とは良好な相溶性を示す。この良好な相溶性は高速通信向け多層基板の要求特性を満たそうとする際の、配合設計の自由度が高い事を意味する。

表 2 の条件に従い、PDVB、熱硬化性 PPE 及び HSBR からなる配合組成物を用いたリジッド CCL を作成し、CCL 物性を測定した。配合組成及び物性の測定結果を表 3 にまとめた。表中の HSBR はスチレン含有率が約 60% のものを使用している。積層板に用いた銅箔は、低粗化箔 (VSP 箔) をベースとし、粗化面の表面処理にビニル基と相性の良いタイプの処理を施したものを使用している。樹脂配合組成の影響を明確化する目的で、シリカフィラー及び難燃剤は加えていない。硬化触媒として過酸化物型のラジカル開始剤を加え、表 2 記載の条件で作成している。

2.4.2 PDVB を用いた積層板の評価結果

PDVB 単体の積層板において、SPDR 法 10GHz による Df の測定値は 0.0018 であり、樹脂のみでの評価よりも高い値を示す。これはガラスクロスと複合化した事による (NE ガラス (日東紡績社製低誘電ガラス繊維) 単体での誘電特性は 10GHz で 0.003 程度)。実際の 5G 向け CCL には、より低 Df のガラスクロスが用いられている³⁾。又 PDVB 単体

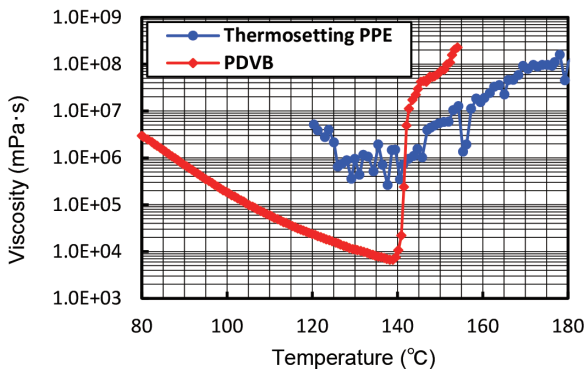


図 6 PDVB 及び熱硬化型 PPE 樹脂の温度 - 粘度曲線
Relationship between temperature and viscosity of PDVB and thermosetting PPE resin

表 2 プリプレグ及び銅張積層板の作成条件

Processing conditions for manufacturing the prepreg and laminate

Prepreg	Glass cloth	NE-Glass #2116
	Drying conditions	130°C×5 min
	Resin content (%)	49-51
Laminate	Number of ply	8
	Copper foil	VSP, 35 μm
	Press conditions	130°C×15 min. ⇒
		210°C×80 min. ×2.0 MPa (Under vacuum)

表 3 PDVB 及びその配合物を用いた積層板の物性
Properties of laminates made from PDVB and its compounds

Property ^{*1}	Run-4	Run-5	Run-6	Run-7	Run-8	Run-9
PDVB	100	70	50	30	63	56
Thermosetting -PPE	0	30	50	70	27	24
HSBR	0	0	0	0	10	20
Dk(-), 10GHz ^{*2}	3.12	3.14	3.16	3.17	3.15	3.05
Df(-), 10GHz ^{*2}	0.0018	0.0023	0.0025	0.0026	0.0023	0.0022
Tg (°C), tan δ, DMA, Three-Point Bend	171	186	185	175	184	181
CTE (ppm/°C) 70-100°C	79	56	56	75	108	145
CTE (ppm/°C) 200-230°C	278	326	361	422	359	400
Cu Peel Strength (kN/m)	0.46	0.66	0.79	0.87	0.77	0.91
IL Peel Strength (kN/m)	0.46	0.74	0.91	1.08	0.89	1.39

*1 Initiator: α, α'-Di(*t*-butylperoxy)- diisopropylbenzene

*2 Split post dielectric resonator (SPDR) measurement

の銅箔剥離強度及び層間剥離強度(表3中のIL Peel, プリプレグ同士の密着強度)は0.46kN/mを示すが、これは熱硬化性PPEを用いた4G通信向け積層板の0.8kN/mと比較し、6割程度である。これに対し、熱硬化性PPEを配合する事で、誘電特性を一部犠牲にしつつ剥離強度及びTgの向上が可能である。剥離後の銅箔界面の観察結果から、実験水準全てで界面での凝集破壊が発生しており、熱硬化性PPEを加えた事により樹脂組成物の靱性が向上し結果剥離強度が向上したと考えられる。この2成分に対して、更に炭化水素のみからなるゴム状の熱可塑性樹脂HSBRを加える事で、誘電正接を維持したまま剥離強度を向上させる事が可能である。以上の様にPDVBは複数の樹脂と組み合わせる事で、本用途に適合する様、物性バランスを制御する事が可能である。

2.4.3 PDVBを用いた積層板の粘弾性挙動

混合して硬化したPDVBと熱硬化性PPEがどの様に3次元架橋しているかを考察する目的で、Dynamic Mechanical Analysis (DMA)による積層板の粘弾性挙動を測定した。その結果を図7に示す(測定周波数:10Hz)。PDVB単体のE', E''を見ると明確なTgを示さず、弾性率の低下幅も小さい他、tan δ も広い温度幅でブロードなピークを与える。

これは、硬化物中の架橋密度に粗密が存在している事を示唆する。この架橋密度の不均一が存在する理由としては、次の二つの要因が考えられる。①PDVBの分子量分布が広い事による、分子鎖毎の反応性官能基数のバラツキが存在する事、②重合の進行に伴う分子鎖毎の組成バラツキが存在する事。②は重合に用いているDVBやスチレン間で反応速度定数が異なるため、モノマーの消費速度に差が生じる。結果、反応系中のモノマー組成が、重合開始時と重合後期で変化し、ペンダントビニル基濃度にバラツキが生じると推測している。

一方、PDVBと熱硬化性PPEとの配合組成物においては、単峰性の明確なTgを与え、tan δ のピークは熱硬化性PPEの含有率が大きくなるほどシャープになる。これは、PDVBに対し熱硬化性PPEの方が一分子当たりのビニル官能基数が小さく(熱硬化性PPEのビニル基当量:1200g/eq.)、PDVBと共重合する事で架橋点間距離が大きくなり、架橋鎖中のポリフェニレンエーテル鎖の影響がより強くなったためと推測される。この事は、PDVBと熱硬化性PPEが硬化過程で良く共重合し、均一となっている事を示唆しており、強度等の特性にバラツキのない積層板を得る事が可能となる。

3. 結 言

5G高速通信用リジッド基板向けの主剤として好適な可溶性PDVBを開発し、その設計、重合挙動及び誘電特性について述べた。又可溶性PDVB及びその配合組成物を

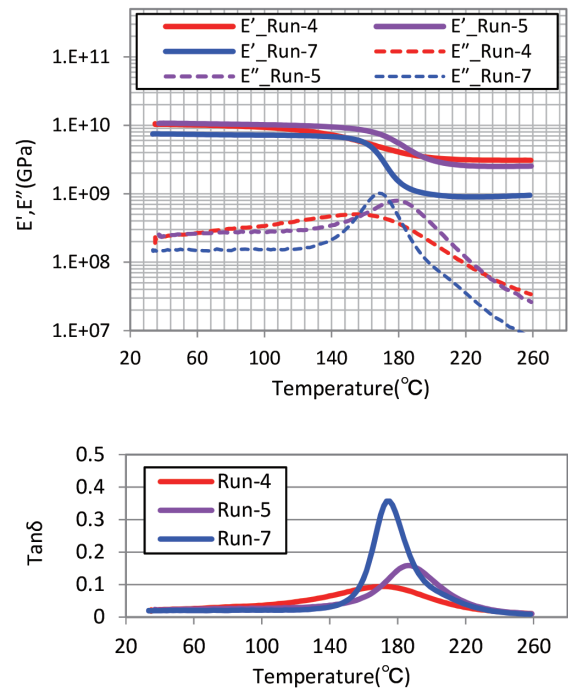


図7 PDVBと熱硬化性PPEとの配合組成物の粘弾性挙動(上図:貯蔵弾性率E'及び損失弾性率E'',下図:損失正接tan δ)

DMA Thermogram for PDVB and thermosetting PPE blends (upper chart: storage modulus E' and loss modulus E'', lower chart: loss tangent tan δ)

用いた積層板を作成、評価し、その特徴について述べた。現在、本稿で述べた技術を応用した可溶性PDVBについて、既に一部顧客で採用され、量産化を行っている。

現在は既に次世代6G通信向けの材料開発が佳境を迎えているが、6G通信向けには誘電正接を更に半分近く低減する事が求められる。又、6G以降の通信手段として、光通信もフォーカスされ始めており、今後高速通信の分野ではこれら幅広い技術分野を俯瞰しながら開発を進める事が必要になると考えている。

参照文献

- 1) 5G通信を実現するコアテクノロジーの将来展望. 2021, 富士キメラ総研. 2021
- 2) 秋山侑祐, 越地福朗, 越地耕二: エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集. 28, 5A-08 (2014)
- 3) 広川祐樹: 第23回プリント配線板EXPO専門セミナーPW-3, 112Gbps対応次世代高速通信伝送用プリント配線板材料, 東京ビッグサイト, 2022年1月20日
- 4) ミリ波レーダ/次世代(5G)通信と高速・高周波基板材料の市場展望-2017-. ジャパンマーケティングサーベイ, 2017
- 5) 稲垣佳那: 生産と技術. 64 (2), 51-53 (2012)
- 6) 布重純, 天羽悟: エレクトロニクス実装学会誌. 12, 333-339 (2009)
- 7) 本多進: 回路実装学会誌. 12 (2), 121-127 (1997)

- 8) 雀部俊樹：化学と教育. 67 (5), 210-213 (2019)
- 9) 川辺正直：ネットワークポリマー論文集. 39 (3), 123-136 (2018)
- 10) 岩下新一, 川辺正直：第 68 回ネットワークポリマー講演討論会 要旨集. 2018
- 11) 川辺正直：接着の技術. 42 (1), 1-17 (2022)
- 12) 大木義路：誘電体物性. 培風館, 2002
- 13) 富川真佐男：成型加工. 34 (1), 12-16 (2022)
- 14) 安藤慎治：ナノファイバー学会誌. 14 (1,2), 8-15 (2023)
- 15) Rumble, John R. : CRC Handbook of Chemistry and Physics (104th ed.). CRC Press LLC (2023/2024) Capt.8, 40-49
- 16) Nitadori, Y., Tsuruta, T.: Makromol. Chem. 179, 2069 (1978)
- 17) Nagasaki, Y., Ito, H., Tsuruta, T.: Makromol. Chem. 187, 23 (1986)
- 18) Uemura, T., Hiramatsu, D., Kubota, Y., Takata, M., Kitagawa, S.: Angew. Chem., Int. Ed. 46, 4987 (2007)
- 19) Hasegawa, H., Higashimura, T.: Macromolecules. 13, 1350 (1980)
- 20) Aoshima, S., Higashimura, T.: J. Polym. Sci (A) Polym. Chem. 26, 393 (1988)
- 21) 後関頼太, 田中俊資, 平尾明, 石曾根隆：高分子論文集. 72 (7), 396-409 (2015)
- 22) Worsfold, D.J.: Macromolecules. 3, 517 (1970)
- 23) Eschwey, H., Hallensleben, M.L., Burchard, W.: Makromol. Chem. 173, 235 (1973)
- 24) Young, R.N., Fetters, L.J.: Macromolecules. 11, 899 (1978)
- 25) Widmaier, J.M.: Makromol. Chem. 186, 2079 (1985)
- 26) Okay, O., Funke, W.: Makromol. Chem. 191, 1565 (1990)
- 27) Hsieh, H.L., Quirk, R.P.: Anionic Polymerization; Principles and Applications. Marcel Dekker, New York, 1996, p.335-347



岩下新一 Shinichi IWASHITA
 日鉄ケミカル&マテリアル(株)
 総合研究所 機能樹脂材料開発センター
 主任研究員 理学博士
 千葉県袖ヶ浦市北袖11-5 〒299-0266