

SD で表面改質した PTFE の高周波分野への利用可能性の評価

Evaluation of the Applicability of Surface-modified PTFE with SD to High-frequency Fields



村上吉明*
Yoshiaki Murakami



片山裕美子*
Yumiko Katayama



坪内 源*
Gen Tsubouchi

金属ナトリウム分散体 (SD) を用いたポリテトラフルオロエチレン (PTFE) の表面改質は、PTFE 表面の平滑性を維持しながら PTFE 表面からフッ素樹脂を除去して親水化可能である。表面分析を行い、SD による表面改質の現象を理解できた。また、表面改質後の PTFE に無電解銅めっきおよび電解銅めっきを行い表面改質後の PTFE と銅箔との引き剥がし強度を測定したところ、フレキシブル銅張積層板の基準値を満たした。さらに製作したフレキシブル銅張積層板の高周波特性を測定したところ、市販の PTFE 基板よりも優れた高周波特性を示した。

Surface modification of PTFE using sodium dispersion (SD) can make the PTFE surface hydrophilic by removing the fluororesin, while maintaining the smoothness of the PTFE surface. To understand the phenomenon of surface modification by SD, surface analysis was performed. Moreover, electroless copper plating and electrolytic copper plating were applied to the surface-modified PTFE, and the adhesion strength between the surface-modified PTFE and the copper foil was measured, which was found to meet the standard for flexible copper-clad laminate. Furthermore, when the high-frequency characteristics of the manufactured flexible copper-clad laminate were measured, it showed superior high-frequency characteristics to those of commercially available PTFE substrates.

Key Words :

金属ナトリウム分散体	Sodium dispersion (SD)
ポリテトラフルオロエチレン	Polytetrafluoroethylene (PTFE)
表面改質	Surface modification
プリント基板	Printed Circuit Board (PCB)
伝送損失	Transmission loss (TL)

【セールスポイント】

- ・ SD を用いることで PTFE の平滑性を維持しながら表面を親水化可能
- ・ 表面改質後の PTFE と銅めっきとの引き剥がし強度はフレキシブル基板の基準を達成可能
- ・ SD 法で改質された PTFE 表面性状はプラズマ処理よりも長期間安定に保持可能
- ・ SD 法で表面改質した PTFE は既存の PTFE 基板よりも優れた高周波特性を実現

*技術開発センター 新技術インキュベーション部

まえがき

近年のデジタルトランスフォーメーション（DX）社会の広がりにより、情報通信量が急速に増加している¹⁾。より多くの情報を短時間で伝達するために高周波信号による高速通信が求められている²⁾。特に近年実用化が進みつつある第5世代移動通信システム（5G）やミリ波レーダーで用いられる24GHz以上の高周波信号高周波領域は、基板材料と交流電流との相互作用によって電気信号が減衰してしまうという課題がある。電気信号が減衰する割合は基板材料の材質や表面粗さによって定まり、特に高性能な基板材料として、ポリテトラフルオロエチレン（以下、PTFE）が注目されている³⁾。

我々はこれまでの検討を通じ、金属ナトリウム分散体（Sodium dispersion：SD、写真1）を用いることで既存のPTFE表面改質技術よりも平滑性を維持しつつ銅めっき可能であることを見出した⁴⁾。本検討ではSDを用いたPTFEの表面改質方法（SD法）の現象に関する考察とSD法を用いて製造したPTFE銅張積層板の銅箔との密着性および高周波特性の評価結果を報告する。



写真1 SDの外観

1. 高周波信号の特徴とPTFE基板について

1.1 高周波信号の特徴

DX社会の実現に求められる高速通信では、短時間に多くの情報を送信可能な高周波信号が必要となる。しかし、周波数が増加すると、信号は基板母材の絶縁体による誘電損失、表皮効果に由来する導体損失、導体表面の荒れに由来する散乱損失の3つにより減衰してしまう。

誘電損失を抑制するには、絶縁体である基板材料が電場から影響を受けにくいことが必要である。電場から影響を受けないためには誘電率および誘電正接が小さな素材を用いればよい。ただし、誘電率が小さい素材は極性を持たないため、導電体との接着

も困難であるという弱点を持っている⁵⁾。

表皮効果は図1のように交流電流の周波数が増加するほどに電流が表面付近に局在する現象である⁶⁾。周波数が増加すると表皮効果によって電子が通過できる面積は小さくなり電気抵抗が増加する。電気抵抗が大きいほどエネルギーの多くが熱として奪われるため電気信号は減衰する。

散乱効果は金属表面の荒れによって電流のエネルギーが失われる現象である⁷⁾。高周波領域では表皮効果により表面の電流密度が増加するため、散乱効果の寄与も大きくなる。

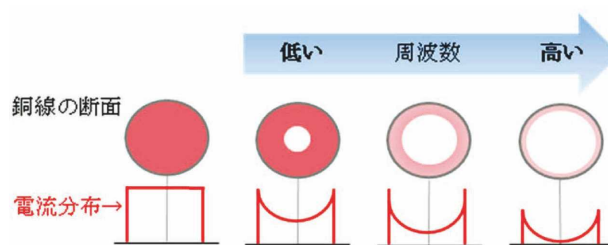


図1 表皮効果

1.2 PTFE基板のメリット/デメリット

PTFE銅張積層板は一般に以下の方法で製造される⁸⁾。

- (1) 溶融させたPTFE中にガラスクロスを浸漬させてガラスクロス内部にPTFEを含浸させる。
- (2) (1)項の表面に表面がザラザラした電解銅箔を貼り付ける。
- (3) (2)項を焼成して銅張積層板とする。

PTFE基板のメリット/デメリットは表1の通りである。

表1 PTFEのメリット/デメリット

項目	内容
メリット	誘電率および誘電正接が小さなPTFEを用いるため、高周波特性に優れた基板になること
デメリット	異種材料との接着が困難
	表面がザラザラしている電解銅箔を用いるために散乱損失が大きい
	ガラスクロスの存在により硬くなる

PTFEは固体としては最も小さな誘電率および誘電正接を有する素材の1つであり、優れた高周波特性を示すというメリットがある。実際、PTFE基板の優れた高周波特性を活かして5Gの通信基地局でもPTFE基板が用いられている⁹⁾。これら既存のPTFE基板は表面がザラザラした電解銅箔をPTFE

に刺しこんで製造しており、高周波領域においては散乱損失が増加する。また PTFE 基板中にはガラスクロスが存在するために物理的に硬くなってしまふというデメリットもある。

2. PTFE 表面改質技術の評価方法

当社が開発した SD 法は SD によって PTFE 表面を親水化する技術である。フッ素樹脂の厚さや形状に依存せず $\phi 0.3$ mm のスルーホールの内側もきれいに改質できる。また表面を物理的に粗化せずに改質できる上、改質した PTFE への銅めっきが可能であることから、SD 法の適用先として次世代の高周波基板製造技術としての利用が考えられた。SD 法が持つ PTFE の厚みや形状を選ばないという強みを活かすため、まだ実用化されていない PTFE 製フレキシブル銅張積層板 (FCCL) をターゲットとした。

FCCL は柔軟性がある母材に銅箔を接合させたもので、通常のプリント配線板よりも軽くて柔らかいことが特徴である。FCCL の母材には従来 PET やポリイミドが用いられてきたが、高速通信に対応するため変性ポリイミド (MPI) や液晶ポリマー (LCP) なども利用されてきている¹⁰⁾。

PTFE 製 FCCL の実用化を目指す上での前提条件として (1) SD 法の現象の理解、(2) プリント基板として実用可能なレベルの引き剥がし強度の確保、が必要である。また既存の基板製造技術と異なる基板製造方法である SD 法が受入れられるには (3) 既存技術よりも優れた高周波特性を持つことが、求められる。

そこで SD 法の現象の理解、引き剥がし強度の測定、高周波特性データの取得を行った。

2.1 改質 PTFE の解析

SD 法の現象を理解するため、ラマン分光および X 線光電子分光 (XPS) 分析によって表面状態を観察した。分析項目を表 2 に示す。試料はブランク、SD 法、ナフタレン法およびアンモニア法によって改質した PTFE を用いた。ナフタレン法はナフタレンを溶解させた溶媒に金属ナトリウムを溶解させ、溶解した金属ナトリウムが PTFE から脱フッ素を行う方法である¹¹⁾。またアンモニア法は液体アンモニア中に金属ナトリウムを溶解させ、溶解した金属ナトリウムが PTFE から脱フッ素を行う方法である。

表 2 分析項目

改質方法	ブランク	SD 法	Nap 法	NH ₃ 法
ラマン分光	文献値	分析	分析	分析
XPS	分析	分析	分析	分析

※ Nap 法：ナフタレン法、NH₃法：アンモニア法

ラマン分光および XPS の概要を以下に示す。

(1) ラマン分光¹²⁾

ラマン効果は物質に光を入射した時、散乱された光の中に入射光の波長と異なる波長の光が含まれる現象である。エネルギー準位の差よりも大きなエネルギーを持つ光が物質に入射すると電子は仮想のエネルギー準位に励起される。このエネルギー準位にある電子のほとんどは元の基底状態に戻る (レイリー散乱) が、一部の電子は入射前とは別のエネルギー準位に下がり、エネルギー差に相当する光を放出する。ラマン分光はこの光の波長から試料の深さ数十 nm までの表面における結合状態を評価する分析である。図 2 にラマン分光のイメージを示す。本検討では波長 633 nm のレーザー光を用いた。

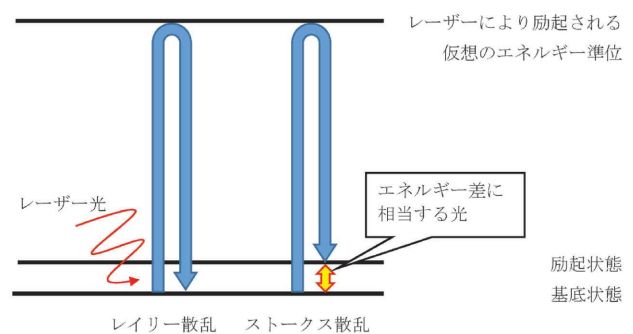


図 2 ラマン分光のイメージ

(2) XPS 分析¹³⁾

XPS はサンプル表面に X 線を照射し、生じる光電子のエネルギーを測定することでサンプルの構成元素とその電子状態を分析する技術である。XPS の最大の特徴は分析深さであり、1 ~ 10 nm と最表面のみを分析できる。代表的な表面分析手段である走査電子顕微鏡エネルギー分散型 X 線分析 (SEM EDS) の分析深さは 1 ~ 5 μ m と XPS よりも 1000 倍程度深いため、試料表面の詳細な構造を観察する上で XPS は有効な手段である。また、本検討では XPS 分析と Ar クラスタによるスパッタリングを組み合わせることで深さ方向の変化を分析した。改質深さはポリスチレンのスパッタリングレートを用いた。なお、SD 法では親水化工程において分子内の炭素原子の数が 3、酸素原子の数が 1 の親水化剤を用いて親水化を行い、C、F、O の元素比率が深さ方向でどのように変化するか測定した。

2.2 引き剥がし強度の測定

プリント基板は、銅張積層板から不要な箇所をエッチングによって取り除き、パターンを形成することで製造される。この時、銅箔が絶縁体に十分に密着していないと形成した回路の銅線が絶縁体から剥

がれて断線の原因になるため、絶縁体と銅箔とはしっかりと密着している必要がある。フレキシブル配線板用銅箔に対する引き剥がし強度の基準は、JPCA 規格において引き剥がし強度0.6 N/mm 以上（銅箔の厚み18, 35, 70 μm の時）と定められている¹⁴⁾。そこで、JPCAの規格で定められた分析方法（JIS C6471）に準拠してめっき銅の引き剥がし試験を行い、引き剥がし強さを測定した。

引き剥がし試験の試料は以下のように作製した。PTFE フィルム（幅30 mm×長さ200 mm×厚さ0.1 mm）に表面改質を行い、無電解銅めっきと電解銅めっきにより厚さ18 μm の銅箔を付与しテストピースとした。テストピース表面の銅箔にカッターで幅3 mm の切込みを入れ、引き剥がし試験の試料とした。JIS C6471に準拠して幅3 mm での引き剥がし試験を行って最小値を引き剥がし強さとした¹⁵⁾。引き剥がし試験は一般財団法人化学物質評価研究機構で行った。

2.3 高周波特性データの取得

A4サイズ、厚さ0.1mm のPTFE フィルムに表面改質および銅めっきを行い、線幅320 μm のマイクロストリップラインを製作して0 Hz~60 GHzでの高周波特性データを取得した。既存技術との比較を行うため、市販のPTFE基板および同社より販売されている次世代型基板でも高周波特性データを取得した。

3. 結果

3.1 SD法の原理の把握

(1) ラマン分光

図3にラマン分光結果を示す。ブランクのPTFEでは290, 385, 734, 1220, 1300, および1380 cm^{-1} にピークが確認された¹⁶⁾。SD法で表面改質したPTFEはブランクのPTFEには見られない1110 cm^{-1} および1495 cm^{-1} にピークが現れた。一方、ナフタレン法で表面改質したPTFEは1200 cm^{-1} よりも大きな波数でのピークが確認できなかった。更にアンモニア法で表面改質したPTFEは734 cm^{-1} の痕跡がわずかに残っているがほとんどピークは確認できなかった。

SD法で表面改質したPTFEに見られた2つのピークは=C-C=の炭素単結合（1100 cm^{-1} ）および付近の-C=C-の炭素二重結合（1490 cm^{-1} ）に由来する。本検討で用いた親水化剤は、C=C結合を持たないため、SD法で表面改質したPTFEは炭素骨格部分が-C=C-のポリアセチレン構造に変化していると考えられる。

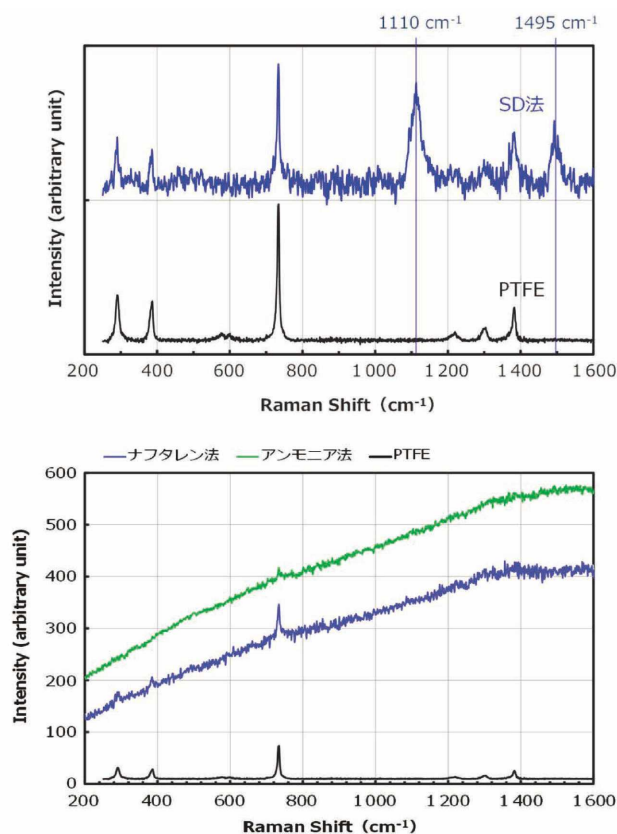


図3 ラマン分光の結果
(上：SD法，下：ナフタレン法およびアンモニア法)

(2) XPS分析

図4にSD法、ナフタレン法、アンモニア法でそれぞれ表面改質したPTFEのXPS分析結果を示す。横軸にポリスチレン換算の改質深さ、縦軸に各元素を取った。

① SD法で表面改質したPTFE

最表面では（炭素）：（酸素）：（フッ素）=81：16：3となった。深さ方向に進むにつれ緩やかにバルクのPTFEに近づき、深さ1 μm ではほぼバルクのPTFEの組成になった。

グラフから表面付近では炭素、酸素、フッ素の比率がほぼ一定の領域が存在し、さらに深い部分では酸素濃度が指数関数的に減少した。

② ナフタレン法で表面改質したPTFE

最表面では（炭素）：（酸素）：（フッ素）=72：23：5となった。深さ方向に進むにつれ緩やかにバルクのPTFEに近づいた。

③ アンモニア法で表面改質したPTFE

最表面では（炭素）：（酸素）：（フッ素）=69：29：2となった。深さ方向に進むにつれ緩やかにバルクのPTFEに近づいた。アンモニア法で表面改質PTFEは最も深くまでフッ素原子が除去されていた。

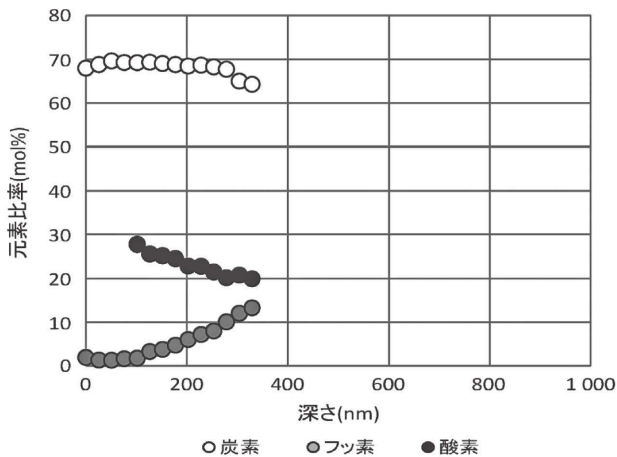
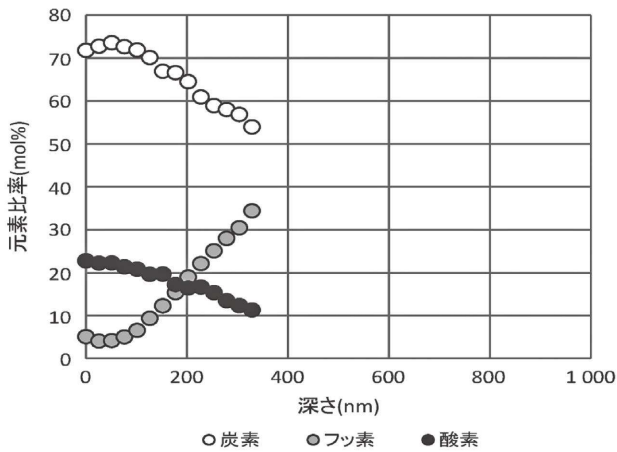
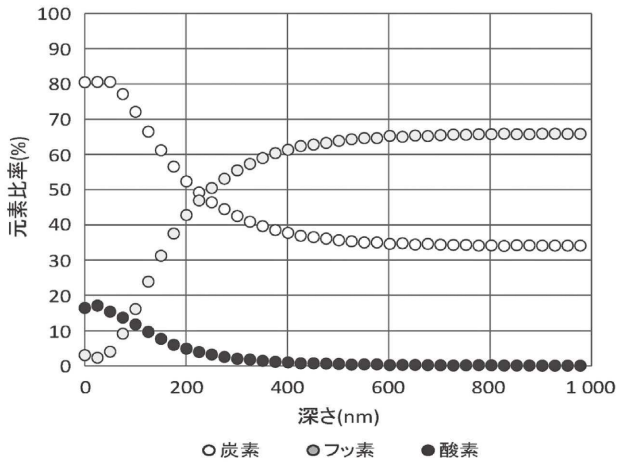


図4 PTFEのXPS分析結果

(上:①SD法, 中:②ナフタレン法, 下:③アンモニア法)

3.2 引き剥がし強度の測定結果

引き剥がし幅は3 mmなので、引き剥がし強度の最小値が1.8 N以上になれば基準を満たす。図5および表3に引き剥がし試験結果を示す。引き剥がし強度は0.83 N/mm以上となり、基準値(0.6 N/mm以上)をクリアした。

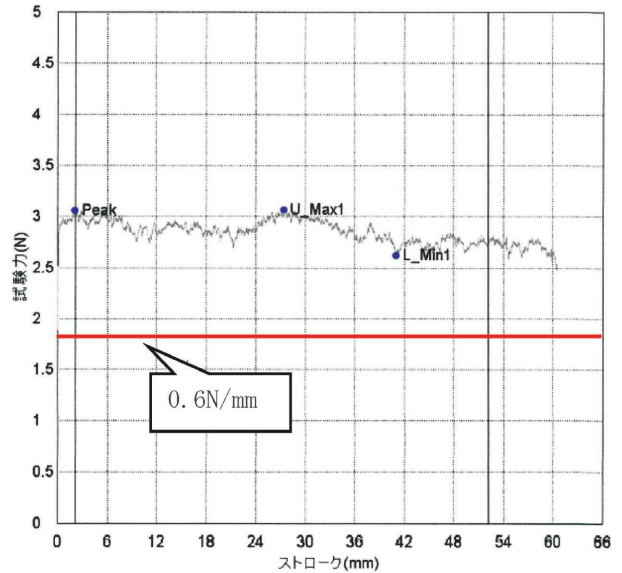


図5 引き剥がし試験結果

表3 引き剥がし試験結果

項目	値	基準
引き剥がし幅 (mm)	3.15	3
引き剥がし力最小値 (N)	2.62	
引き剥がし強度 (N/mm)	0.83	≥0.6
評価	合格	

3.3 高周波特性データの測定結果

表4に20 GHzにおける誘電率および誘電正接を示す。比較として1 MHzにおけるPTFEの誘電率および誘電正接を記載する。SD法で表面改質したPTFEの誘電率および誘電正接は母材のPTFEよりもわずかに増加した。

表4 SD法で表面改質したPTFEの物性値

物性	SD法	PTFE (1 MHz)
誘電率	2.070	2.1
誘電正接	5.27×10^{-4}	2×10^{-4}

図6にSD法で表面改質したPTFE、図7に市販のPTFE基板の高周波測定結果をそれぞれ示す。マイクロストリップラインの幅が320 μmのデータと比較すると、SD法で表面改質したPTFEの減衰は60 GHzで約3 dB/100 mmであったのに対し、市販のPTFE基板は標準品の場合には約5~6 dB/100 mm、低粗度銅箔を用いた場合でも4~5 dB/100 mmとなり、SD法によって製造したPTFE基板は優れた高周波特性を示した。

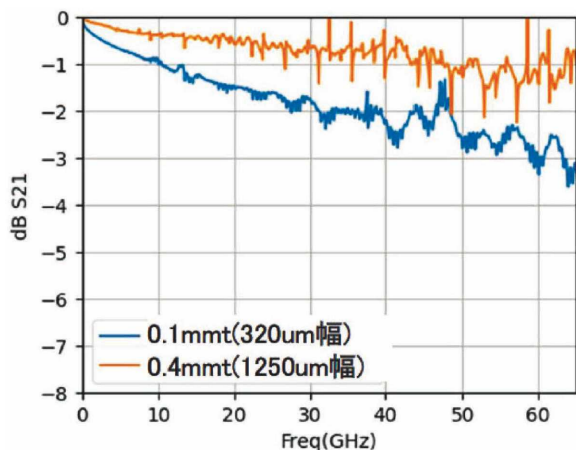


図6 SD法で表面改質したPTFEの高周波特性データ

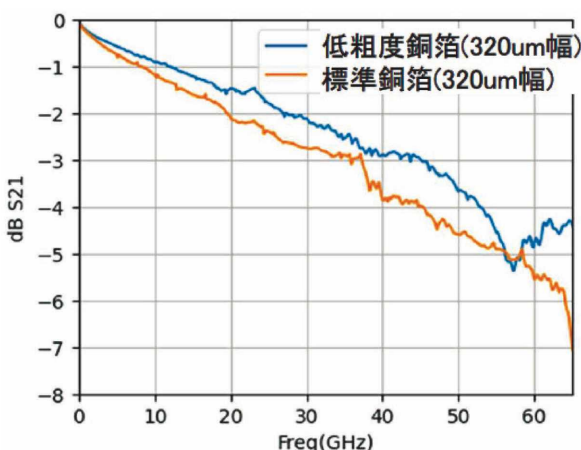


図7 市販のPTFE基板の高周波特性データ

4. 考察

4.1 PTFE表面の構造

(1) 表面構造

ラマン分光の結果から、PTFE表面の炭素骨格には最大1つの官能基が付与されることがわかる。仮にPTFE骨格を形成する炭素1つに対して親水基(炭素数3, 酸素数1)が付与すれば表面の元素比率は炭素=80%, 酸素=20%になるはずである。実際に表面近傍においては予想通りの結果となった。

(2) 深さ方向での元素組成の変化

XPS分析の結果から、ある深さまでは炭素、フ

ッ素、酸素の元素組成はほぼ一定となった。また、酸素原子濃度の対数を縦軸にとると、酸素濃度は指数関数的に減少した。元素比率が一定値となる領域を最表面と定義し、その深さを d_0 とする。PTFE表面においてPTFE分子の骨格を形成する1つの炭素に1つの親水化剤が付与し、そこから指数関数的にバルクのPTFEに近づくモデルを考える。酸素濃度を $[O]$ 、最表面における酸素濃度を $[O]_0=1/5$ 、改質深さを d とすれば深さ x における酸素濃度は次式で表現できる。ただし、式(2)は式(1-2)を微分形式で表現したものであり等価である。

$$[O] = d_0 \quad (x < d_0) \quad \dots \text{式 (1-1)}$$

$$[O] = 1/5 \exp \{ -(x - d_0)/d \} \quad (x \geq d_0) \quad \dots \text{式 (1-2)}$$

$$d[O]/dx = -1/d [O] \quad \dots \text{式 (2)}$$

式(2)から酸素原子は x 軸方向(深さ方向)における酸素濃度の差に比例して置換されている、すなわち図8に示すように深さ方向のナトリウム濃度差に比例してナトリウム化が進行すると考えられる。更にナトリウム化した場所が親水化されることでSD法は進行すると考えられる。なお、図中でNaを○で囲んだ箇所はナトリウム原子が配位したPTFE骨格の炭素原子とナトリウムを表し、OHを○で囲んだ箇所は親水化されたPTFE骨格の炭素原子と親水基を表す。

上記のモデルに基づけば炭素原子及びフッ素原子の濃度も導出できる。炭素濃度 $[C]$ およびフッ素濃度 $[F]$ は改質深さを d 、バルクの炭素濃度 $[C]_\infty = 1/3$ 、バルクのフッ素濃度 $[F]_\infty = 2/3$ を用いて以下のように書けると予想される。

$$[C] = 4/5 \quad (x < d_0) \quad \dots \text{式 (3-1)}$$

$$[C] = \frac{1}{3} + \frac{7}{15} \exp \{ -(x - d_0)/d \} \quad (x \geq d_0) \quad \dots \text{式 (3-2)}$$

$$[F] = 0 \quad (x < d_0) \quad \dots \text{式 (4-1)}$$

$$[F] = \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \exp \{ -(x - d_0)/d \} \quad (x \geq d_0) \quad \dots \text{式 (4-2)}$$

予想モデルの妥当性を評価するため、{(予想モデルから算出される元素濃度) - (バルクの元素濃度)}

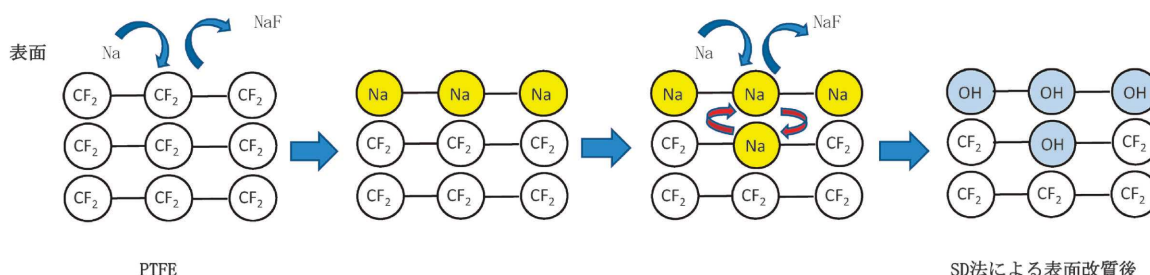


図8 PTFEのナトリウム化の模式図

の絶対値を対数プロットした結果を図9, 3つのグラフの傾きから求めた改質深さ d および切片から求めた最表面深さ d_0 を表5に示す。3つのグラフはほぼ同じ傾きの直線となった。3つのグラフから求めた改質深さおよび最表面深さの平均値を表面改質での改質深さおよび最表面深さとする、改質深さおよび最表面深さはそれぞれ134.0 nm および44.8 nm と求められた。

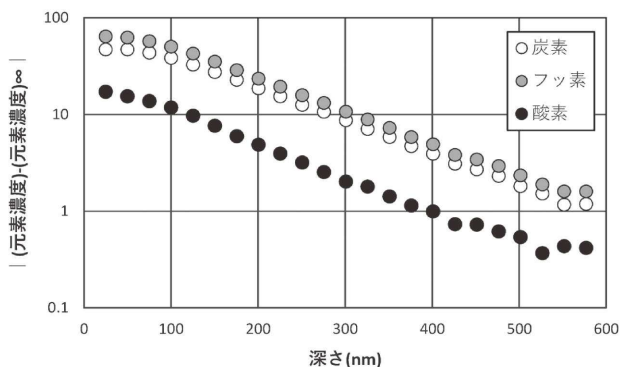


図9 元素濃度の予想モデルとの比較

表5 改質深さの計算結果

	改質深さ (d) (nm)	最表面深さ (d_0) (nm)
炭素	134.9	67.8
フッ素	134.4	53.6
酸素	132.8	12.9
平均	134.0	44.8

XPS 分析により得られたデータを式(1-1)～式(4-2)に代入し, d および d_0 を代入して XPS 分析結果と比較した結果を図10に示す。予想式と分析結果はよく一致しており, 改質された表面の元素比率はほぼ予想モデルで説明可能と思われる。

以上から, SD 法の表面改質は以下のように進行すると考えられる。

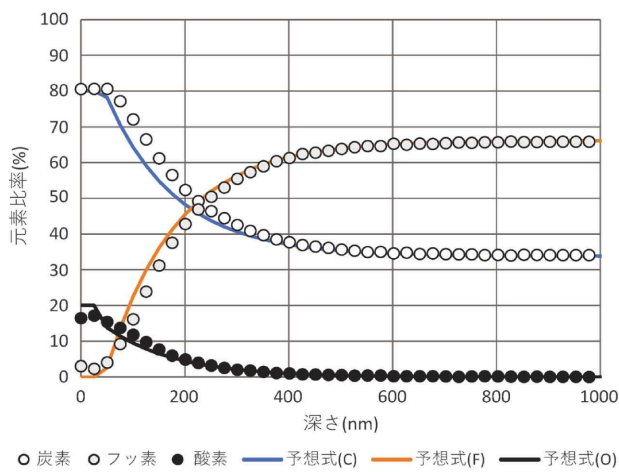


図10 XPS 分析結果と予想モデルの比較結果

①SDによってPTFE表面のフッ素が除去され, (炭素) - (炭素) 結合が単結合から (単結合) - (二重結合) の繰返しのポリアセチレン構造に変化する。

②1つの炭素原子に1つのナトリウム原子が付与する。

③親水化剤との反応によりナトリウム原子が親水基に変化して親水化される。

(3) 表面改質された面の安定性

一般にプラズマによって改質されたPTFEは表面改質後30分以内にめっきを実施することが必要とされている。一方, SD法の場合は表面改質からめっきまでに数日間のタイムラグがあるが, めっきの密着性は規格値を満たした。2つの表面改質方法の安定性について考察する。

PTFE分子の相図および各相におけるPTFE分子の回転のイメージ図を図11に示す¹⁸⁾。PTFE分子は19~30℃を跨いで結晶構造が変化する。19℃以下(II相)では13/6のらせん構造(13個のモノマーが6らせん周期を形成)が三斜晶的に配列した秩序相と考えられている。19℃以上(IV相)では15/7のらせん構造(15個のモノマーが7らせん周期を形成)に変化する。回転が励起されてらせん軸まわりに微小な角度の乱れが発生する。さらに30℃以上(I相)では15/7のらせん構造のままだが, らせん軸まわりでの自由回転で近似できるような大きな角度の乱れが発生する。表面改質による改質深さが浅い場合, PTFE分子の回転に伴って改質された面が内側に潜り込んでしまい, 結果的に改質されていない面がむ

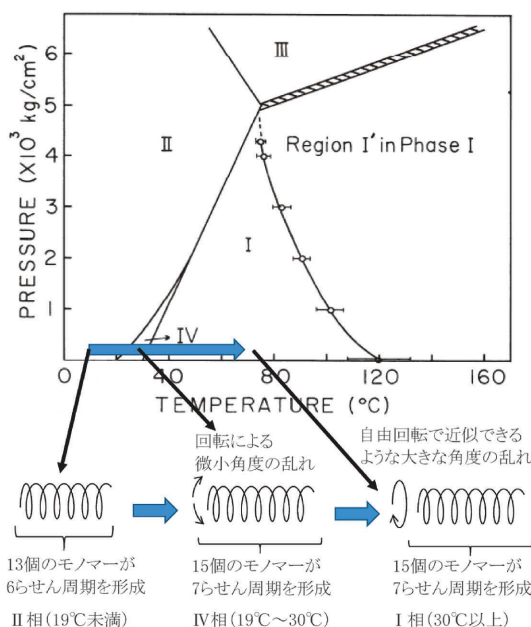


図11 PTFE分子の相図(上)および各相におけるPTFE分子の回転のイメージ図(下)

き出しになる可能性がある。そのため、表面改質した PTFE にめっきする場合、改質された面がむき出しになっている間に行う必要がある。

プラズマ処理は改質深さが浅いため表面改質された面の寿命が短い可能性がある。一方、SD 法の改質深さは $0.1 \mu\text{m}$ のオーダーである。PTFE の分子量 (100 万以上¹⁷⁾) および (炭素)–(炭素) 結合間距離 1.54 \AA ($=1.54 \times 10^{-4} \mu\text{m}$) から計算される PTFE 分子の長さ数 μm と比較すると十分に小さいが (炭素)–(フッ素) 結合間距離 134 \AA ($=1.34 \times 10^{-4} \mu\text{m}$) から計算される PTFE 分子の太さ数百 \AA と比較すれば十分に大きい。SD 法によって改質された PTFE 分子のイメージ図を図 12 に示す。改質された箇所の両端は PTFE 分子によって縫い付けられているため容易に剥がれ落ちることは無い。また、改質された分子は深さ方向に多数積層しているため、分子が回転してもすぐに埋もれずに安定に存在できると推測される。

表面改質された面の寿命が長ければ、表面改質からめっき処理までの期間の自由度が高くなって工程管理が容易になる。このことから SD 法はプラズマ処理よりも安定性において優れていると考えられる。

4.2 高周波特性データ

(1) 伝送損失

SD 法で表面改質した PTFE の誘電率及び誘電正接はブランクの PTFE と近い値となり、高周波特性においても優れた結果を示した。3.3 で示した通り、表面改質に伴い誘電率および誘電正接は増加していることから、改質された表面の誘電率および誘電正接は PTFE よりも高い値であると考えられる。母材の PTFE と改質された表面層を直列に接続されたコンデンサーとみなせば、改質深さが深いほど誘電率や誘電正接が増加して伝送損失も悪化する。4.1 の結果も加味すると、SD 法の改質深さは必要かつ十

分な範囲にあると考えられる。

(2) 表面状態

SD 法で表面改質した PTFE の誘電率、誘電正接および高周波特性データとシミュレーション結果との比較により、SD 法で表面改質した PTFE の表面粗度は約 $0.16 \mu\text{m}$ と計算された。これは SD 法で表面改質した PTFE の表面粗度の測定値 ($R_a = 0.13 \mu\text{m}$) 程度であった。また、上記シミュレーション結果において、誘電損失、導体損失、散乱損失の割合はそれぞれ約 1 割、7 割、2 割となった。PTFE の表面粗度を更に平滑化することで更に散乱損失を低減できる可能性はあるが、PTFE の物性値によって定まる誘電損失と銅の物性値によって定まる導体損失をこれ以上低減させることは現実的に不可能である。そのため、伝送損失を現状よりも 2 割以上低減させることは困難であり、現在の伝送損失は、ほぼ限界に近いレベルまで低減できていると思われる。

5. まとめ

金属ナトリウム分散体 (SD) を用いた PTFE の表面改質技術 (SD 法) のメカニズムおよび PTFE 製 FCCL への適用可能性を検討した。

検討の結果、以下が確認でき PTFE 製 FCCL への適用の可能性が示された。

- (1) SD 法では PTFE 表面の 1 つの炭素原子に結合している 2 つのフッ素原子が外れる。(炭素)–(炭素) 結合は単結合からポリアセチレン構造に変化し、炭素骨格の残りの 1 本の手にはナトリウム原子が付与される。
- (2) (1) と親水化のための薬剤を反応させることで PTFE 表面を深さ 134 nm まで親水化できる。
- (3) 表面改質深さは長期間の安定性を確保しつつ高周波特性を向上させる範囲に収まっていると考えられる。
- (4) 表面改質後の PTFE に無電解銅めっきおよび電解銅めっきを行い表面改質後の PTFE と銅箔と

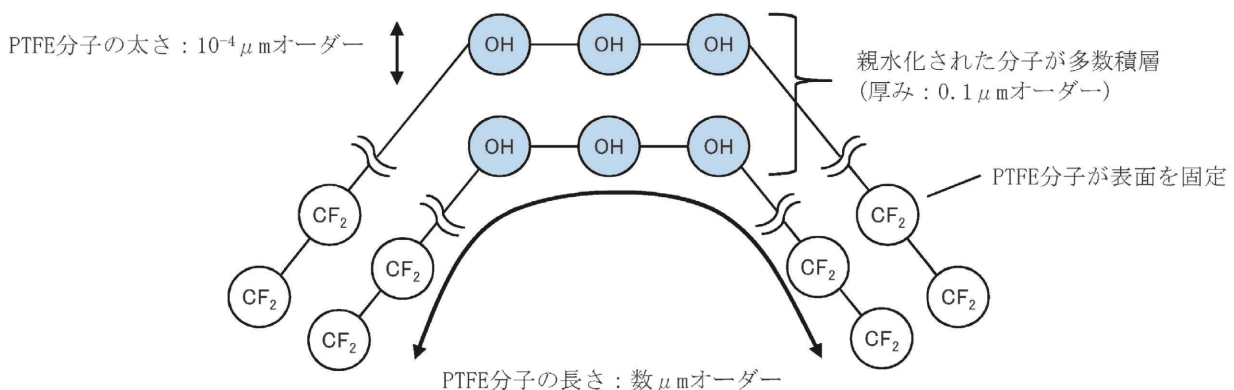


図 12 SD 法によって改質された PTFE 分子のイメージ図

の引き剥がし強度を測定したところ、フレキシブル銅張積層板の基準値を満たした。

- (5) SD法によって改質したPTFEの高周波特性は既存のフレキシブル基板やリジッドのPTFE基板よりも優れた結果となり、理論上の限界に近い結果になった。

むすび

本技術はまだ開発途上であり、工業化に向けては処理プロセスの連続化など解決すべき課題は多い。ただ、世の中のニーズにもマッチしているうえ、PTFE表面のフッ素原子を微細構造に合わせて種々の官能基に置換できる可能性がある。今後の更なる可能性の広がりにも期待したい。

最後に、本研究並びにSDの有効利用に際して多くの助言をいただきました岡山大学大学院自然科学研究科高井和彦特命教授および理化学研究所環境資源科学研究センター機能有機合成化学研究チームのイリエシユ・ラウレアンチームリーダー、浅子壮美上級研究員、並びにご協力いただきました関係者各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 令和3年 情報通信白書 第1部 第2節
- 2) 令和2年 情報通信白書 第1部 第1節
- 3) 技術情報協会：高周波対応部材の開発動向と5G、ミリ波レーダーへの応用 (2019), p.87, 214, 241-242

- 4) 片山ら：神鋼環境ソリューション技報, vol.18, No12 (2021), p.24-29
- 5) 中谷 隆：化学と教育, vol.46, No5 (1998), p.304-308
- 6) 霜田光一：物理教育, vol.61, No1 (2013), p.18-20
- 7) 小栗ら：プリント基板上高速信号伝送における信号損失要因, 第29回エレクトロニクス実装学会春季講演大 (2015), 16, p.1-17, 2015年3月16日
- 8) JFIA 日本弗素樹脂工業会：フッ素樹脂ハンドブック改訂13版 (2014), p.61-62
- 9) 富士キメラ総研：2020年～2030年をターゲットとする次世代新規低誘電マテリアルの徹底探索 (2019), p.67
- 10) 富士キメラ総研：2020年～2030年をターゲットとする次世代新規低誘電マテリアルの徹底探索 (2019), p.88-97
- 11) Kiryong Ha et al. : J.Adhsion, Adhesion to Sodium Naphthalenide Treated Fluoropolymers Part I-Analytical Methodology vol.33 (1991), p169-184
- 12) 小林雅通：高分子, vol.40, 5月号, (1991), p338-341
- 13) 吉原一紘：J. Vac. Soc. Jpn., Vol.56, No.4, (2013), p.153-157
- 14) 日本電子回路工業会：電子回路基板規格第3版, (2017), 第16項, p.23-30
- 15) 日本電子回路工業会：電子回路基板規格第3版, (2017), 第16項, p.128-131
- 16) 白石ら：TANSO, No187 (1999), p.88-95
- 17) 近藤ら：高分子論文集, vol.66, No.12 (2009), p.585-590
- 18) 猿山ら：Netsu Sokutei, vol.44, No2 (2017), p.55-59