

# 液体充填同軸線路を用いた液晶の複素誘電率測定

阿部 新司, 佐藤 弘康, 陳 強, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫(東北大学大学院工学研究科)

## 1. まえがき

近年, 通信環境の変化に応じて電波の放射する方向を電氣的に制御可能なアンテナが求められている. 具体的には第 5 世代高速通信(5G)等の例が挙げられる. 第 4 世代通信(4G)では, 広い角度の範囲に電波を放射させているのに対し, 5G では高速通信を行うために鋭いビームを放射させ, 通信端末が移動する場合移動に合わせてビーム方向を制御する必要がある. 特に多くの人々が集中するエリアで快適な通信を行うことが可能な第 5 世代高速通信システムを実現するためには移相器を用いたフェーズドアレーアンテナによるビーム方向の走査が重要となる.

そこで, 本研究では液晶を用いた位相器に着目している. 液晶は結晶と液体の中間状態である物質全般を指し, 液体の流動性と結晶の異方性を併せ持つ液状の物質である. 液晶は誘電率が変化する特徴があることから, 伝送線路の誘電体部分の代わりに液晶を用いることで, 液晶部分の誘電率を変化させることで線路の電氣的な長さや位相を制御することが可能である.

液晶を用いた移相器の原理を説明する. 液晶は分子がラグビーボールの形状をしており, 分子の向きごとに異なる誘電率を持つという特徴がある. そして, この液晶に電圧を印加することで分子の向きが変化し, 誘電率も変化する. 誘電率は電波の位相速度を決める数値であるため, この液晶を用いた伝送線路に対し電圧を印加することで伝送線路の電氣的な長さを制御することができ, 位相変化を得ることができる.

以上の特性を持つ液晶を利用することで, 低コストでビーム方向を電氣的に制御可能なフェーズドアレーアンテナの実現が期待できるが, 液晶の伝送損失値が大きいこと, 誘電率変化に高電圧が必要なこと, 誘電率変化値が小さい傾向にあること, 電圧の反応速度が小さいなどの問題もある. そのため, 液晶の高周波誘電率を通して伝送線路に適した液晶の選定をすることも重要となる.

液晶を含む液体の複素誘電率の測定方法として, 開放同軸線路を液体に接触させて測定する同軸プローブ法が良く用いられるが, 液晶のように低周波電圧を液体に印加することは困難である. 固体

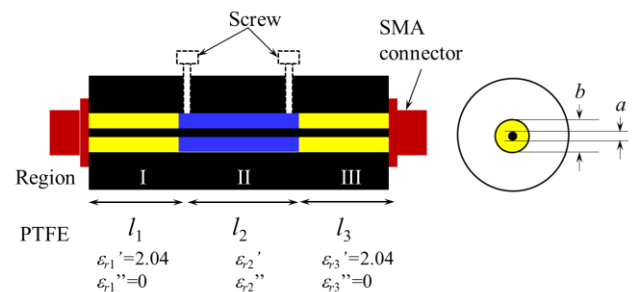
材料の誘電率測定において, 中空同軸線路の中央に挿入して測定する同軸線路法があるが, 液体の充填が困難である.

そこで, 本報告では液体への電圧印加が可能な液体誘電率測定法を提案するとともに, 液体充填同軸線路を試作し, 誘電率が既知の様々な固体, 液体を測定して妥当性を確認するとともに, 液晶の複素誘電率を測定した結果を述べる.

## 2. 液体充填同軸線路

液体充填同軸線路の構造を図 1 に示す. 中空同軸線路の領域 I と領域 III に PTFE (テフロン) を挿入し, PTFE で封止された領域 II に液体を充填する. 液体の充填は領域 II の上部に設けたねじ穴から行い, 完全に充填されてからねじで封止することができる. ここで, 同軸線路両端に装着した SMA コネクタは市販されているものの芯線を外し, 試作した太さ 1.27 mm の芯線を同軸線路全体にわたり貫通させることで芯線の不連続がないようにしている. この構造では同軸線路の外導体と内導体間に低周波電圧を印加することも可能であり, 電圧印加によって液晶の配向を変化させることが可能である.

同軸線路内部における伝送路は 3 層媒質の平面波と等価であり, 3 層媒質における平面波の反射係数と透過係数は次式で与えられる.



Parameter	Dimension [mm]
$l_1 (=l_3)$	15
$l_2$	23.5
$b$	4.05
$a$	1.27

(a)



(b)

図1：導体柱が近接した垂直偏液晶充填同軸線路の

(a) 構造 と (b) 写真

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{12}(1 - e^{-j4\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_{r2}}})}{1 - \Gamma_{12}^2 e^{-j4\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

$$T_{13} = \frac{(1 - \Gamma_{12}^2) e^{-j2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_{r2}}}}{1 - \Gamma_{12}^2 e^{-j4\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon_{r2}}}} \quad (2)$$

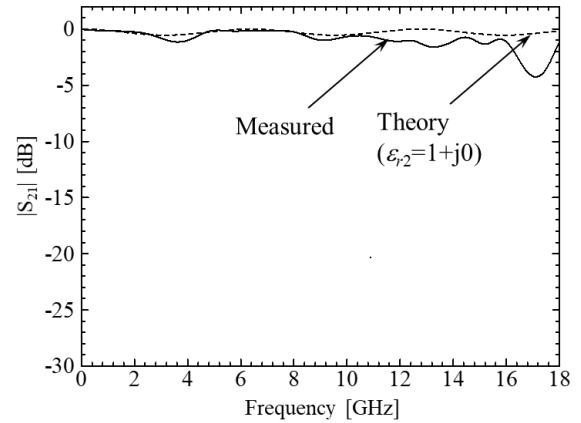
$$\Gamma_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_j + Z_i} = \frac{\sqrt{\mu_j / \epsilon_j} - \sqrt{\mu_i / \epsilon_i}}{\sqrt{\mu_j / \epsilon_j} + \sqrt{\mu_i / \epsilon_i}} \quad (3)$$

媒質 2 の複素誘電率 $\epsilon_{r2}$ の実部と虚部を未知数とし、透過係数の理論値  $T_{13}$  実部および虚部と、測定した透過係数  $S_{21}$  の実部および虚部の 2 等式の連立方程式を 2 次元ニュートン法により算出し、媒質 2 の複素誘電率 $\epsilon_{r2}$ を求める。ここで、媒質 1 および媒質 3 の PTFE の複素誘電率は $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 2.04 + j0$  とする。

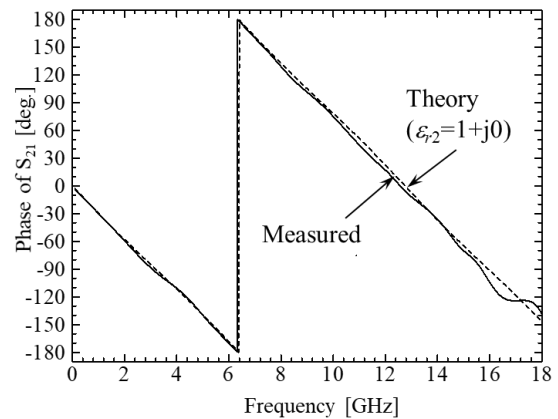
## 2. 空気、PTFE 及び純水の誘電率測定

媒質 2 として何も挿入しない空気で封止した場合の透過係数  $S_{21}$  の振幅と位相を図 2(a)、図 2(b)にそれぞれ示す。図の破線は式(2)による理論値、実線は実測値を示す。振幅は大きな差はなくほぼ一致しているものの、カーブの傾向に違いがみられた。また、位相については低周波では傾きを含め一致したが、3.5GHz 以上でずれが生じた。

推定した空気の複素誘電率を図 3 に示す。12 GHz における実部は 1.03、虚部は -0.04 であった。実部のわずかなずれの原因は位相のずれ、虚部のわずかなずれは振幅のずれによるものと考えられる。



(a) 振幅



(b) 位相

図2： $S_{21}$  の振幅と位相 ( $\epsilon_{r2}$ : 空気の場合)

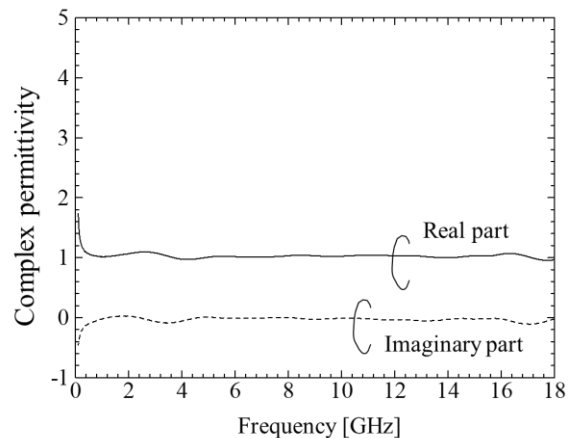
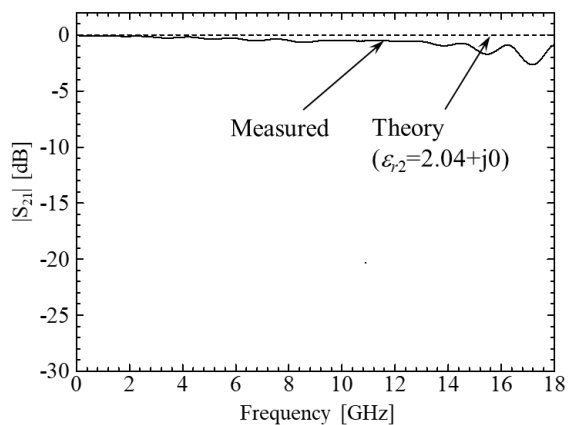


図3：空気の複素誘電率の推定値

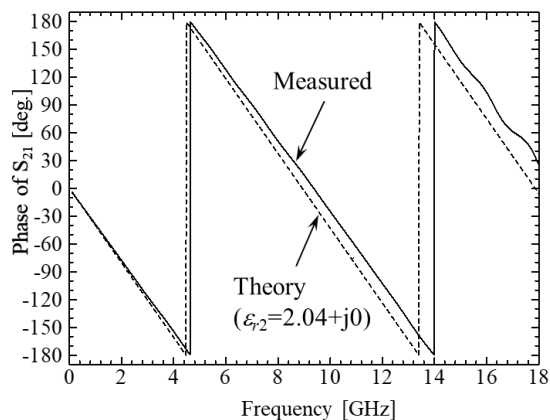
媒質 2 として PTFE で封止した場合の透過係数  $S_{21}$  の振幅と位相を図 4(a)、図 4(b)にそれぞれ示す。図の破線は式(2)による理論値、実線は実測値を示す。理論上透過係数が 0 dB であるが、低周波では損失が小さく、理論値と概ね一致した。一方、位相の傾きは高周波帯で測定値と理論値がわずかに

異なっている。これは理論値において損失を考慮していないためと考えられる。

推定した PTFE の複素誘電率を図 5 に示す。12 GHz における実部は 1.87, 虚部は -0.03 であった。実部が 2.04 よりも全体的に低くなった理由は位相のずれと考えられ、位相の傾きが精度に関連していると考えられる。



(a) 振幅



(b) 位相

図 4 : S<sub>21</sub> の振幅と位相 ( $\epsilon_{r2}$ : PTFE の場合)

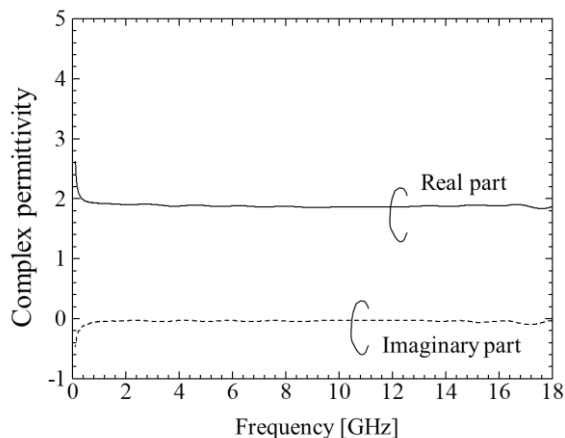
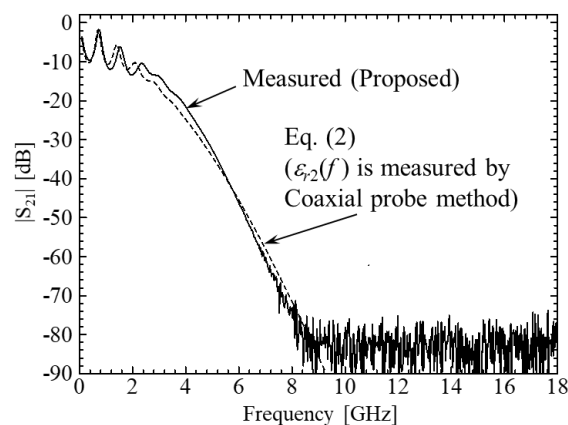


図 5 : PTFE の複素誘電率の推定値

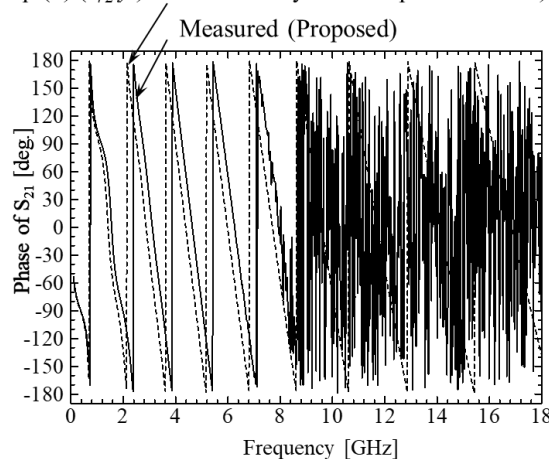
媒質 2 として純水で封止した場合の透過係数 S<sub>21</sub> の振幅と位相を図 6(a), 図 6(b)にそれぞれ示す。図の破線は、同軸プローブ法で求めた複素誘電率  $\epsilon_{r2}$  を式(2)に代入して求めた値、破線は本手法で得た実測値を示す。理論値と測定値は概ね一致した。透過係数は減衰が激しく、8 GHz 以上の周波数では -80 dB 以下となりノイズに埋もれてしまい測定が困難であった。低周波帯では強い共振が観測された。位相については振幅と同様に 8 GHz 以上において測定が困難である。低周波帯における位相の傾向は両者概ね一致している。

以上の結果から、誘電率推定は 6 GHz 以下について行った。推定した純水の複素誘電率を図 7 に示す。誘電率の虚部から導電率を算出して表示した。比誘電率、導電率共に概ね同様の傾向が得られているものの、値の大きなずれが生じた。ひとつの考えられる原因として、透過係数が小さいこ



(a) 振幅

Eq. (2) ( $\epsilon_{r2}(f)$  is measured by Coaxial probe method)



(b) 位相

図 6 : S<sub>21</sub> の振幅と位相 ( $\epsilon_{r2}$ : 純水の場合)

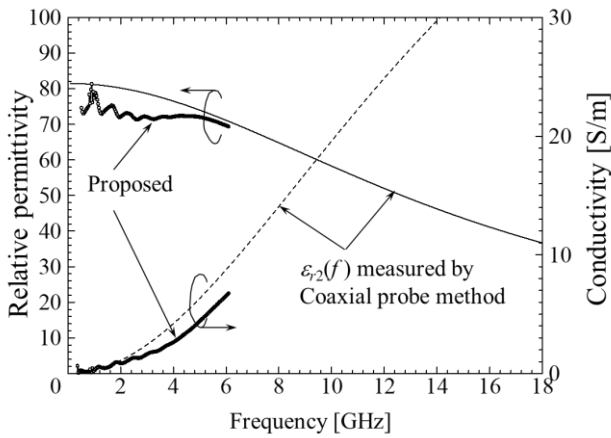


図7：純水の複素誘電率の推定値

とが考えられ、損失の小さい材料の測定では透過係数を用いた推定が有効であり、高損失材料の場合は反射係数を用いた誘電率推定の検討が必要と考えられる。

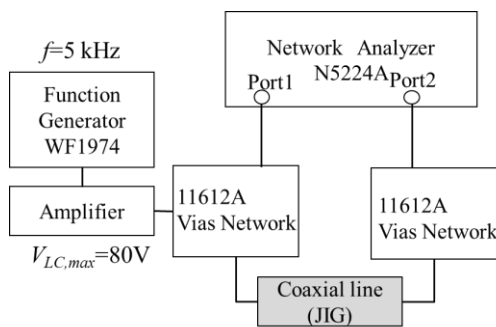


図8：液晶の複素誘電率の測定系

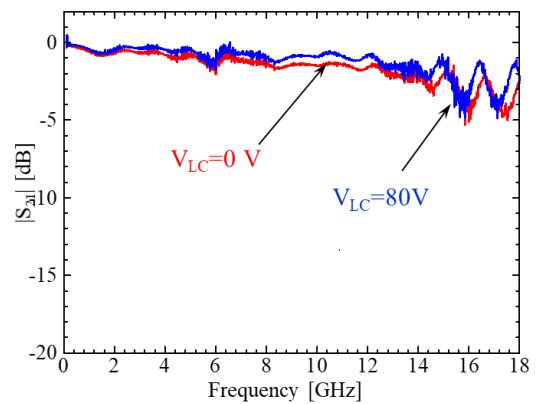
### 3. 液晶の誘電率測定

液晶の複素誘電率の測定系を図8に示す。同軸線路治具の領域IIに液晶としてE7を封入し、透過特性の測定を行った。ファンクションジェネレータで周波数  $f=5$  kHz の低周波電圧を発生させ、増幅器を用いて  $V_{LC}=80$  V の低周波電圧を液晶に印加することができる。ベクトルネットワーク・アナライザ N5224A (Ajilent 社) の2ポートに低周波電圧が入らないように、バイアスネットワーク 11612A (Ajilent 社) を両ポートに接続している。以上の測定系を用いて同軸線路治具の外導体と内導体間の低周波電圧  $V_{LC}$  を変化させて透過係数を測定した。

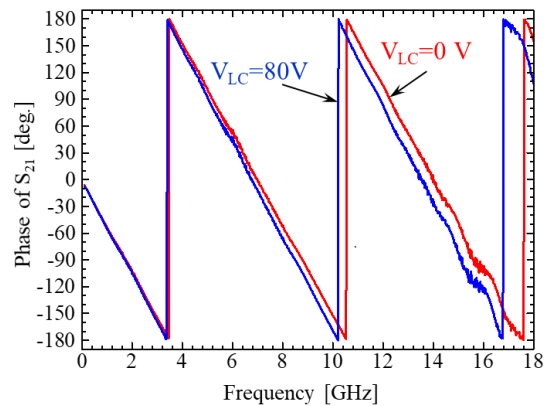
$V_{LC}=0$  V と 80 V の場合の透過係数  $S_{21}$  の振幅と位相を図9(a), 図9(b)にそれぞれ示す。電圧  $V_{LC}$  を印加した場合としない場合において、透過係数の

振幅および位相が変化した。このことから、電圧印加によって実際に液晶の配向が変化し、誘電率に変化したことを確認できた。また、電圧印加時に透過振幅が大きいことから、電圧印加した場合の液晶配向において誘電正接が小さいことがわかる。さらに、電圧印加時に透過位相の傾きが大きいことから、電圧印加した場合の液晶配向において比誘電率が大きいことがわかる。

推定した液晶 E7 の比誘電率と誘電正接を図10(a), 図10(b)にそれぞれ示す。赤線は印加電界方向と垂直方向、青線は水平方向の分子配向の場合の複素誘電率を示している。12 GHz における水平配向の場合の比誘電率 3.5, 誘電正接 0.02, 垂直配向の場合の比誘電率 3.2, 誘電正接 0.05 が得られた。これらの値は文献[1]と概ね一致しており、開発した液体充填同軸線路治具による誘電率推定法の妥当性が確認された。

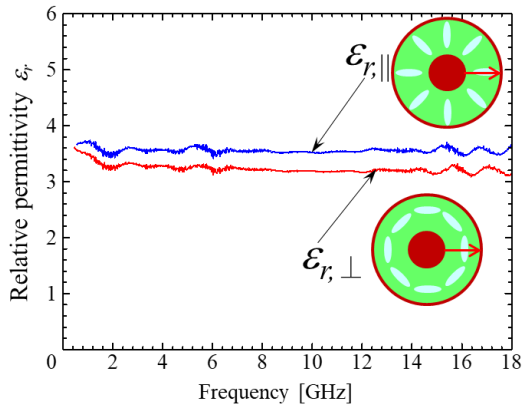


(a) 振幅

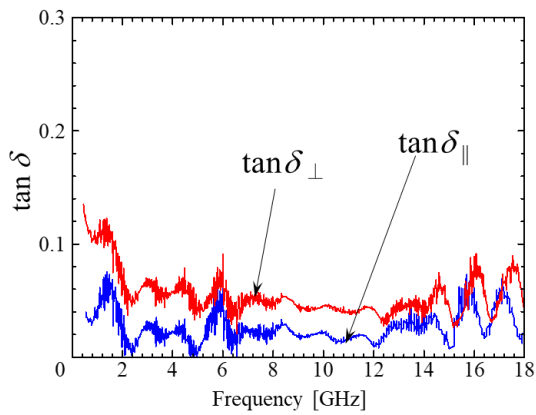


(b) 位相

図9：S<sub>21</sub>の振幅と位相 ( $\epsilon_2$ : 液晶 E7, 印加電圧を変化した場合)



(a) 比誘電率



(b) 誘電正接

図 10 : 液晶 E7 の複素誘電率の推定値

#### 4. まとめ

同軸線路型誘電率測定治具を提案し、空気や PTFE、純水の透過特性測定による測定法の妥当性を確認した。また、実際に液晶 E7 を封入して外導体と内導体間に低周波電圧を印加した際の伝送特性を測定し、液晶の配向により比誘電率と誘電正接が変化すること、概ね妥当な誘電率の値が得られることを確認した。

#### 参考文献

- [1] T.Kuki, H. Fujikake, T. Nomoto, and Y. Utsumi, "Design of a microwave variable delay line using liquid crystal and a study of its insertion loss," Electron. Commun. Jpn., vol. 85, no. 2, pp. 36-42, Feb. 2002.