

電磁波に対する FRP 板の透明度の測定

飯 口 真 一・井 上 昭・提 坂 秀 樹

1. 序 言

宇宙航空研究所の FRP 研究グループでとりまとめた FRP 材の最も普通のもの複素誘電率を測定し、それをラドームに用いたときの電磁波の損失を推定するのが目的である。複素誘電率の測定は、周波数 9 GHz 帯と 24 GHz 帯を用いて行なった。

ラドームは形が複雑であるので、最も単純な例として一様平面波が FRP 板に垂直に入射した場合の損失を計算した。

複素誘電率の測定方法は、矩形導波管内に直方体の試料を管内にみたくように入れ誘電体だけで共振する状態、すなわち 1/2 波長板になった状態の板厚から複素誘電率の実数部を、そのときの損失から虚数部を算出する方法によった。今回試料として用いた FRP 材では、上記の方法によるとほとんど労せずして妥当な値を得ることができた。

測定値より複素誘電率を算出するにあたり、基本式の使いやすいものが見当たらなかったため、その導き方および結果の式を列挙することとした。現在までの測定によれば、9 GHz 帯では比複素誘電率の実数部が 4.25 で測定によるバラツキが 2% 程度である。tan δ は 0.016 で測定によるバラツキは 8% 程度である。

また、この材料を用いてラドームを製作した場合、無限領域で真空中の一様平面波が FRP 板に垂直に入射したものとすると、9 GHz 帯における損失は 0.28 dB (1/2 波長板) から 2.10 dB (1/4 波長板) の間である。

2. 測定法の原理

低損失の誘電体スラブが、導波管をみたしたときの解析

図 1 のように矩形導波管をみたした厚さ l の誘電体に TE₁₀ 波が入射した場合を考える。(あとで取り扱うことになるが、開放形で一様平面波が垂直入射した場合も形式的には全く

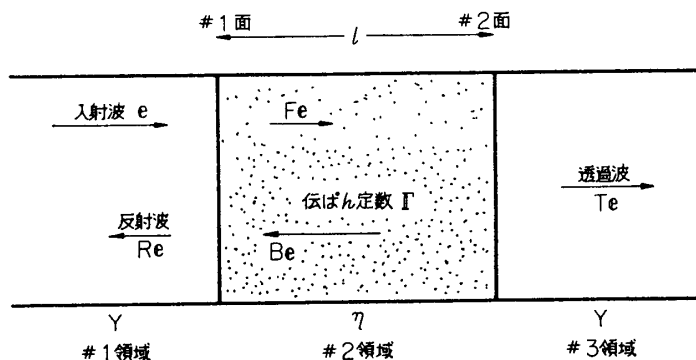


図 1 低損失の誘電体スラブが導波管をみたした場合

同様となる)。

入射波の電界を e , 誘電体中の伝搬定数を Γ とし, 反射係数 R , 透過係数 T , などを図1のように定める。

No. 1面における No. 1領域の電界および磁界は, No. 1領域の電波アドミタンスを Y とし,

$$e + Re \quad (1)$$

$$Yh - YRh \quad (2)$$

No. 1面における No. 2領域の電界および磁界は, No. 2領域の電波アドミタンスを η とし,

$$Fe + Be \quad (3)$$

$$\eta Fh - \eta Bh \quad (4)$$

No. 2面における No. 2領域の電界および磁界は

$$Fe^{-\Gamma l} + Be^{\Gamma l} \quad (5)$$

$$\eta Fhe^{-\Gamma l} - \eta Bhe^{\Gamma l} \quad (6)$$

No. 2面における No. 3領域の電界および磁界は

$$Te \quad (7)$$

$$YTh \quad (8)$$

(1) 式, (3) 式; (2) 式, (4) 式; (5) 式, (7) 式; (6) 式, (8) 式を等しいとおけば

$$1 + R = F + B \quad (9-a)$$

$$Y(1 - R) = \eta(F - B) \quad (9-b)$$

$$Fe^{-\Gamma l} + Be^{\Gamma l} = T \quad (9-c)$$

$$\eta(Fe^{-\Gamma l} - Be^{\Gamma l}) = YT \quad (9-d)$$

(9) 式より F , B , を消去すれば反射係数 R , および透過係数 T は

$$R = \frac{-\left(1 - \frac{Y^2}{\eta^2}\right) \sin h \Gamma l}{\left(1 + \frac{Y^2}{\eta^2}\right) \sin h \Gamma l + 2 \frac{Y}{\eta} \cos h \Gamma l} \quad (10)$$

$$T = \frac{2 \frac{Y}{\eta}}{\left(1 + \frac{Y^2}{\eta^2}\right) \sin h \Gamma l + 2 \frac{Y}{\eta} \cos h \Gamma l} \quad (11)$$

ただし, Y : 真空中の電波アドミタンス

η : 誘電体中の電波アドミタンス

Γ : 誘電体中の伝搬定数

l : 誘電体の板厚

反射係数 R について, $\Gamma = \alpha + j\beta$ とおき, αl が1より一けた程度小さいと考えると

$$R \doteq \frac{-\left(1 - \frac{Y^2}{\eta^2}\right)(\alpha l \cos \beta l + j \sin \beta l)}{\left(1 + \frac{Y^2}{\eta^2}\right)(\alpha l \cos \beta l + j \sin \beta l) + 2\frac{Y}{\eta}(\cos \beta l + j\alpha l \sin \beta l)} \quad (12)$$

上式で $\cos \beta l = 0$ のとき $|R|$ が最小となる。

このとき

$$R \min \doteq -\frac{1}{2}\left(\frac{\eta}{Y} - \frac{Y}{\eta}\right)\alpha l \quad (13)$$

したがって $|R|$ が最小であるときの V. S. W. R. は

$$\begin{aligned} (\text{V. S. W. R.}) \min &= \frac{1 + |R \min|}{1 - |R \min|} \doteq \frac{1 + \frac{1}{2}(\hat{\eta} - \hat{\zeta})\alpha l}{1 + \frac{1}{2}(\hat{\eta} - \hat{\zeta})\alpha l} \\ (\text{V. S. W. R.}) \min &\doteq 1 + (\hat{\eta} + \hat{\zeta})\alpha l \end{aligned} \quad (14)$$

ただし,

$$\hat{\eta} = \frac{\eta}{Y} = \frac{1}{\hat{\zeta}}$$

透過係数 T について (11) 式より

$$T \doteq \frac{2\hat{\zeta}}{(1 + \hat{\zeta}^2)(\alpha l \cos \beta l + j \sin \beta l) + 2\hat{\zeta}(\cos \beta l + j\alpha l \sin \beta l)} \quad (15)$$

(15) 式は $\alpha l \gg 1$ であるが, βl については制限のない式である。この式で $\sin \beta l = 0$ とおくと

$$T \doteq \frac{2\hat{\zeta}}{(1 + \hat{\zeta}^2)\alpha l + 2\hat{\zeta}}(-1)^n \quad (16)$$

(ただし n は整数)

ここで損失 $= -20 \log |T| \text{ dB}$ で定義されることから (16) 式を用いて

$$(\text{損失}) \doteq 4.343 \alpha l (\hat{\eta} + \hat{\zeta}) \text{ dB} \quad (17)$$

となる。

3. 測定法および測定結果

3.1 測定法

一般に誘電体の比誘電率 ϵ_r は複素数であり, これを

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta) \quad (18)$$

とする。また比透磁率 μ_r は 1 であるとしてさしつかえない。誘電率 ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$), 透磁率 ($\mu = \mu_0$) なる誘電体中の一様平面波の伝搬定数 γ は (18) 式を考慮して,

$$\gamma^2 = -\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r = -\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 (\epsilon' - j\epsilon'') \quad (19)$$

またこのような誘電体をみたした導波管中における伝搬定数 Γ は管壁を無損失と考えれば

$$\Gamma = \sqrt{\gamma^2 + K_c^2} \quad (20)$$

ただし, $K_c = 2\pi/\lambda_c$, λ_c : 導波管のしゃ断波長。 $\Gamma = \alpha + j\beta$ とおき (19) 式, (20) 式を用いて α, β を計算すると,

$$\alpha \doteq \frac{\pi \epsilon'' \lambda g'}{\lambda^2} \quad (21)$$

$$\beta \doteq \frac{2\pi}{\lambda' g} \quad (22)$$

$$\lambda' g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (23)$$

ただし λ : 自由空間波長 (μ_0, ϵ_0 をみたした空間での) $\lambda' g$: 誘電率 ϵ' の誘電体をみたした導波管の管内波長である.

(i) 比複素誘電率の実数部 ϵ' の測定

図2のように矩形導波管 (TE₁₀ 波) の一部に測定すべき FRP 試料 (厚さ l) をつめ, その両端面が導波管の軸に直角であるようにする. 次に発振器の周波数を変化させ, おのこの周波数に対して試料より発振器側に取付けた定在波測定器により V. S. W. R. を測定する. V. S. W. R. が最小になる周波数 f_0 においては, 厚さ l の試料が 1/2 波長板と考えられる. したがってこのときの誘電体中における管内波長を λ_{g0}' とすると次式が成り立つ.

$$n \times \frac{\lambda_{g0}'}{2} = l \quad (24)$$

ただし n は整数.

厚さ l の異なる試料をいくつか用いて, この測定を行えば λ_{g0}' を決定することができる.

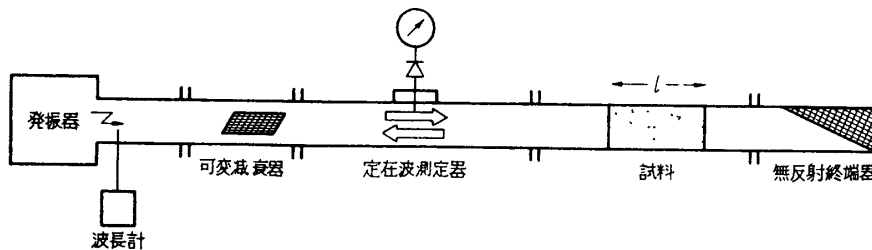


図2 ϵ' の測定回路

(23) 式を用いて

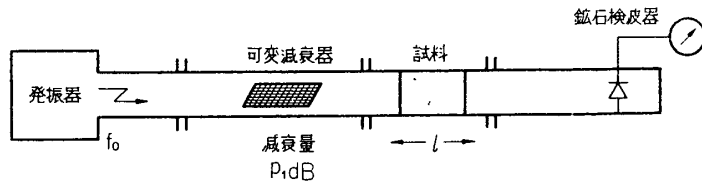
$$\epsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{g0}'}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 \quad (25)$$

ただし λ_0 : 周波数 f_0 における自由空間波長 (ϵ_0, μ_0 をみたした空間での) である. (25) 式より ϵ' を求めることができる.

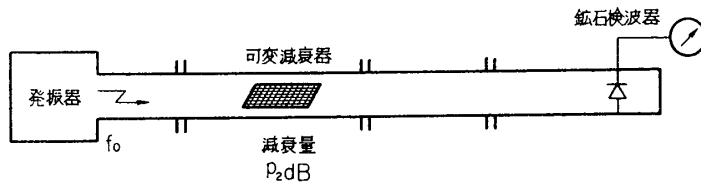
(ii) 比複素誘電率の虚数部 ϵ'' の測定と $\tan \delta$ の算出.

図3において (a) の様に試料をそう入したときの可変減衰器の減衰量を $P_1 dB$ とし, (b) の様に試料をとり除いた場合検波器出力が (a) と同じになるよう減衰器を調整する. このときの減衰器を $P_2 dB$ とすると, そう入損失 $P dB$ は $P = p_1 - p_2$ (dB) となる.

試料が 1/2 波長板であるときそう入損失 $P dB$ と誘電体中の減衰定数の関係は (17) 式



(a) 試料挿入



(b) 試料なし

第3図 ϵ'' の測定回路

で与えられる。すなわち $P \doteq 4.343 \alpha l (\eta + \zeta)$ (ただし $\alpha l \ll 1$ である必要がある。)

一方減衰定数 α と、誘電体の比複素誘電率の虚数部 ϵ'' の関係は (21) 式で与えられる。すなわち

$$\alpha \doteq \frac{\pi \epsilon'' \lambda_0'}{\lambda^2};$$

以上の二つの式より、

$$\epsilon'' \doteq \frac{P \lambda^2}{4.343 \pi \lambda_0' l (\eta + \zeta)} \quad (26)$$

となり ϵ'' を求めることができる。また $\tan \delta$ は

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (27)$$

より求めることができる。

3.2 測定結果

周波数 9 GHz 帯および 24 GHz 帯を用いて、FRP-F 52 の誘電率を測定した。その結果を表 1 に示す。なお F 52 の組成を表 2 に示す。

表 1 FRP-F 52 の比誘電率および $\tan \delta$

周波数帯	ϵ'	$\tan \delta$	測定時の温度, 湿度
9GHz _z	4.25	0.016	21°C, 80%
24GHz _z	3.94	0.022	21.5°C, 62%

表 2 FRP-F 52 の組成および硬化条件

ガラス繊維含有量 (旭ファイバ R-153-801)	重量比 74 %
プラスチックの配合	重量比
チッソノックス (エポキシ)	100
無水メチルハイミック酸 (MHAC)	110
ポリプロピレングライコール (GP 600)	30
2E4M ₂ (イミダゾール)	1
硬化条件	120°C で 1 時間その後 160°C で 4 時間

4. ラドームに使用した場合の電磁波の損失

4.1 真空中の一様平面波が FRP 板に垂直入射した場合の損失

ここでは最も簡単な例として、無限領域で真空中の一様平面波が FRP の平板に垂直に入射した場合の損失について計算する。その場合の損失は、周波数と板厚と複素誘電率に依存するが 1/2 波長板では損失は最小で、損失の主要部分は板内の熱損失による。1/4 波長板では損失が最大となり、損失の主要部分は反射損による。

理論式は、初めに述べた導波管内の反射透過現象の解析の式と形式的に全く等しい。

いまの場合、真空中の電波アドミタンス Y 、FRP 中の電波アドミタンス η 、FRP 中の伝搬定数 Γ を皆一様平面波のものと考えればよい。(ここで別の記号を用いないが混乱は起こらないであろう。)

一般式は (11) 式である。 $al \ll 1$ とすれば (15) 式となる。したがって 1/2 波長板での損失は (17) 式である。

1/2 波長板から少し離れた場合、すなわち $\sin^2 \beta l \gg al$ のときは al を無視してもほとんど変わらない。そのとき (11) 式または (15) 式より

$$|T| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}(\eta - \zeta)^2 \sin^2 \beta l}} \quad (28)$$

したがって

$$(\text{損失}) \doteq 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4}(\eta - \zeta)^2 \sin^2 \beta l \right] (dB) \quad (29)$$

さらに、1/4 波長板のときは (29) 式において $\sin^2 \beta l = 1$ とおけばよい。したがって損失は

$$(\text{損失})_{1/4 \text{ 波長板}} \doteq 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4}(\eta - \zeta)^2 \right] (dB) \quad (30)$$

ついでに 1/2 波長板にかなり近い場合、すなわち $al \sin \beta l$ も省略できない場合は

$$(\text{損失}) \doteq 4.343 \left[(\eta + \zeta) al + \frac{1}{4}(\eta - \zeta)^2 \sin \beta l \right] (dB) \quad (31)$$

この式で、 $\sin^2 \beta l = 0$ とおけば、1/2 波長板の損失の式になるが、 $\sin^2 \beta l$ が小ではあるが、

al と同程度のときに無視すれば正しい値の半分程度の値となる。

4.2 FRP-F52 をラドームとして用いた場合の損失

使用周波数 9 GHz, このとき $\epsilon' = 4.25$, $\tan \delta = 0.016$ とし, ①ラドーム肉厚 $l = 8$ mm, ②ラドーム肉厚 $l = 6$ mm ③ラドーム肉厚 $l = 4$ mm の三つの場合を考える. 9 GHz で $\epsilon' = 4.25$ なる誘電体中の波長 λ' mm は $\lambda' = \lambda / \sqrt{\epsilon'} = 16.2$ mm

ただし, λ : 9 GHz における自由空間波長.

① 肉厚 $l = 8$ mm のとき,

$l \approx \lambda'/2$ すなわち, $1/2$ 波長板と考えられるから (17) 式を用いて計算を行なえば損失は 0.28 dB となる.

② 肉厚 $l = 6$ mm のとき

$1/2$ 波長板より離れた場合の損失は, (29) 式で与えられる. これを用いて計算を行なえば損失は 1.22 dB となる.

③ 肉厚 $l = 4$ mm のとき

$l \approx \lambda'/4$ すなわち, $1/4$ 波長板と考えられるから (30) 式より損失を計算すれば, 損失は 2.10 dB となる.

①, ②, ③, の結果をまとめて表3に示す.

表3 F52 をラドーム材として用いた場合の損失例 (9 GHz において)

ラドーム肉厚 (mm)	損失 (dB)	
8	0.28	$\frac{1}{2}$ 波長板
6	1.22	
4	2.10	$\frac{1}{4}$ 波長板

1968年8月13日 計測部