

# 斜め配置ゴム複合板の変形拘束と損失正接

阿部武治\* 森兼靖公\*\* 小石正隆\*\*\*  
海藤博幸\*\*\* 加部和幸\*\*\*

## Loss Tangent and Constraint of Deformation of Composite Rubber Plate with Inclined Layers

Takeji ABE, Yasuhiro MORIKANE, Masataka KOISHI, Hiroyuki KAITOU,  
and Kazuyuki KABE

Tensile deformation of composite rubber plate with inclined layers to the stress axis is analysed. The complex stress and strain components are considered and the transfer of the components between two layers is assumed in the normal and the shear directions to the layers. The loss tangent is estimated based on different analytical models. The analytical results are compared with the experimental data and discussion is made on the assumption in the analysis.

Key words : Loss tangent, Composite rubber plate, Constraint of deformation

### 1. 緒 言

粘弾性体であるゴムの複合体の解析は、タイヤの動的性能などの基礎的研究としても重要である<sup>1) - 6)</sup>。粘弾性に対する重要な材料定数として、複素弾性率と損失正接 (loss tangent) がある。複素 (動的) 弾性率は、静的弾性力学における Hooke の法則の弾性係数を、粘弾性体の動力学挙動に対して拡張したものである。また損失正接はタイヤなどゴム材料の重要な材料特性値となっている。

本報告では、粘弾性体としてゴムを考え、それが不均質であるとした場合に考えられる2種類のゴムからなる複合体について、損失正接などを解析的に求めるとともに実験結果と比較検討する。応力軸に対して斜めに配置するゴム積層板を考え、1軸方向に対する弾性定数を線形複合則を用いて求める方法を拡張することにより、種々の斜め角度に対するゴム複合体の複素弾性率および損失正接を求める。解析に用いる仮定を変えた場合の解析を示し、実験結果と比較することによって、解析方法の妥当性を検証する。

### 2. 解 析 方 法

Fig. 1 に示すように、一方向に配列された2種類

のゴムからなる複合体を考える。このとき、繊維方向 (配列の方向) から角度  $\theta$  だけ傾いた方向に  $x$   $y$  座標を取り、 $x$  方向の複素弾性率 ( $E^*$ , 実数部  $E'$ , 虚数部  $E''$ ) の理論値を  $\theta$  の変化に対して求める<sup>1)</sup>。すなわち、

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

であり、このとき損失正接は次のように与えられる。

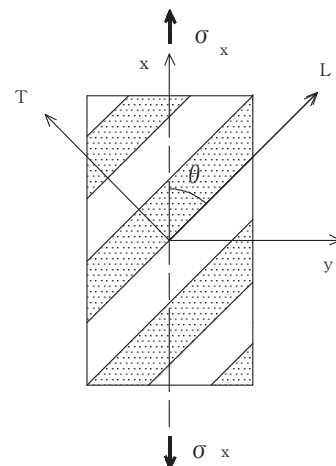
$$\tan \delta = E'' / E' \quad (2)$$

#### 2. 1 線形複合則の複素表示

一方向に配列された複合体の繊維方向と繊維直角

Fig. 1 Model of rubber composite plate with inclined layers

方向における動的特性は、複合体の動的特性が各構



原稿受付 平成19年8月31日

\* 校長

\*\* 兵庫県庁 神戸市中央区山手通5-10-1

\*\*\* (株) 横浜ゴム 平塚市追分2-1

成要素の複素弾性率から線形複合則を用いて求められるとすると次のように与えられる。なお、以下の式において添字  $f$  と  $m$  は各構成要素を表しており、後に述べる実験の黒ゴム、白ゴムに対応する。

- (1) 繊維方向の複素弾性率  $E_L^*$  と損失正接

$$\tan \delta_L$$

$$E_L^* = E_L' V_f + E_m' V_m \quad (3)$$

$$E_L' = E_f' V_f + E_m' V_m \quad (4)$$

$$E_L'' = E_f'' V_f + E_m'' V_m \quad (5)$$

$$\tan \delta_L = \frac{E_f'' V_f + E_m'' V_m}{E_f' V_f + E_m' V_m} \quad (6)$$

- (2) 繊維直角方向の複素弾性率  $E_T^*$  と損失正接

$$\tan \delta_T$$

$$E_T^* = \frac{1}{\frac{V_f}{E_f^*} + \frac{V_m}{E_m^*}} \quad (7)$$

$$E_T' = \frac{\frac{E_f' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m' V_m}{|E_m^*|^2}}{\left( \frac{E_f' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m' V_m}{|E_m^*|^2} \right)^2 + \left( \frac{E_f'' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m'' V_m}{|E_m^*|^2} \right)^2} \quad (8)$$

$$E_T'' = \frac{\frac{E_f'' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m'' V_m}{|E_m^*|^2}}{\left( \frac{E_f' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m' V_m}{|E_m^*|^2} \right)^2 + \left( \frac{E_f'' V_f}{|E_f^*|^2} + \frac{E_m'' V_m}{|E_m^*|^2} \right)^2} \quad (9)$$

$$\tan \delta_T = \frac{|E_m^*|^2 E_f' V_f + |E_f^*|^2 E_m' V_m}{|E_m^*|^2 E_f' V_f + |E_f^*|^2 E_m' V_m} \quad (10)$$

- (3) 複素剛性率  $G_{LT}^*$  と損失正接  $\tan \delta_{LT}$

$$G_{LT}^* = \frac{1}{\frac{V_f}{G_f^*} + \frac{V_m}{G_m^*}} \quad (11)$$

$$G_{LT}' = \frac{\frac{G_f' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m' V_m}{|G_m^*|^2}}{\left( \frac{G_f' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m' V_m}{|G_m^*|^2} \right)^2 + \left( \frac{G_f'' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m'' V_m}{|G_m^*|^2} \right)^2} \quad (12)$$

$$G_{LT}'' = \frac{\frac{G_f'' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m'' V_m}{|G_m^*|^2}}{\left( \frac{G_f' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m' V_m}{|G_m^*|^2} \right)^2 + \left( \frac{G_f'' V_f}{|G_f^*|^2} + \frac{G_m'' V_m}{|G_m^*|^2} \right)^2} \quad (13)$$

$$\tan \delta_{LT} = \frac{|G_m^*|^2 G_f'' V_f + |G_f^*|^2 G_m'' V_m}{|G_m^*|^2 G_f' V_f + |G_f^*|^2 G_m' V_m} \quad (14)$$

- (4) 複素ポアソン比  $\nu^*$

繊維方向の複素ポアソン比  $\nu_{LT}^*$

$$\nu_{LT}^* = \nu_f^* V_f + \nu_m^* V_m \quad (15)$$

繊維直角方向の複素ポアソン比  $\nu_{TL}^*$

$$\nu_{TL}^* = \nu_{LT}^* \frac{E_T^*}{E_L^*} \quad (16)$$

## 2. 2 複合体の任意方向の動的特性

Fig. 1 において、繊維方向から  $\theta$  だけ傾いた  $x-y$  座標における応力—ひずみ関係は、複素コンプライアンス  $C^*$  を用いて次式のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^* \\ \varepsilon_y^* \\ \gamma_{xy}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^* & C_{12}^* & C_{16}^* \\ C_{21}^* & C_{22}^* & C_{26}^* \\ C_{61}^* & C_{62}^* & C_{66}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

境界条件が  $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$  のとき、複素ひずみ  $\varepsilon_x^*$  は次のように与えられる。

$$\varepsilon_x^* = C_{11}^* \sigma_x \quad (18)$$

ここで、 $C_{11}^*$  は次式で示される。

$$C_{11}^* = \frac{\cos^4 \theta}{E_L^*} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T^*} + \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( -\frac{\nu_{LT}^*}{E_L^*} - \frac{\nu_{TL}^*}{E_T^*} + \frac{1}{G_{LT}^*} \right) \quad (19)$$

これから、 $x$  方向の複素弾性率  $E_x^*$  の実数部、虚数部および損失正接  $\tan \delta_x$  は次式で与えられる。

$$E_x' = \frac{C_{11}'}{C_{11}'^2 + C_{11}''^2}, \quad E_x'' = \frac{C_{11}''}{C_{11}'^2 + C_{11}''^2}$$

$$\tan \delta_x = \frac{C_{11}''}{C_{11}'} \quad (20)$$

### 3. 複合体の構成要素の動的特性から求めた計算結果

ここでは、実験から求めた複合体の各部材の動的特性値（複素弾性率の実数部  $E'$  と損失正接  $\tan \delta$ ）を用いて、実際の計算を行ってみる。はじめに部材がゴムであり、一般にポアソン比が 0.5 とおけることから、各部材の複素弾性率の虚数部  $E''$  および複素剛性率  $G^*$  の実数部と虚数部が次式で求められる。

$$E'' = E' \tan \delta, \quad G' = \frac{E'}{3}, \quad G'' = \frac{E''}{3} \quad (21)$$

これらを 2.1 節で示した式に代入することによって、繊維方向および繊維直角方向の複素弾性率などが求められる。さらに、2.2 節で示した関係を用いることにより、複合体の  $x$  方向の複素弾性率および損失正接が求められる。なお、この場合においては複素弾性率などを次のようにおく。

$$E_L^* = E_L' (1 + i \cdot \tan \delta_L),$$

$$E_T^* = E_T' (1 + i \cdot \tan \delta_T),$$

$$G_{LT}^* = G_{LT}' (1 + i \cdot \tan \delta_{LT}),$$

$$\nu_{LT}^* = \nu_{LT}' (1 + i \cdot \tan \delta_L) \quad (22)$$

このとき、複素コンプライアンス  $C_{11}^*$  の実数部と虚数部として次式を得る。

$$C_{11}' = \frac{\cos^4 \theta}{E_L' (1 + \tan^2 \delta_L)} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T' (1 + \tan^2 \delta_T)}$$

$$+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( -2 \frac{\nu_{LT}'}{E_L'} + \frac{1}{G_{LT}' (1 + \tan^2 \delta_{LT})} \right) \quad (23)$$

$$C_{11}'' = \frac{\cos^4 \theta}{E_L' (1 + \tan^2 \delta_L)} \tan \delta_L$$

$$+ \frac{\sin^4 \theta}{E_T' (1 + \tan^2 \delta_T)} \tan \delta_T \quad (24)$$

$$+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \frac{\tan \delta_{LT}}{G_{LT}' (1 + \tan^2 \delta_{LT})}$$

### 4. 複素ポアソン比 $\nu^*$ の検討

以上の検討において、ポアソン比を複素数として設定しているが、このことの妥当性について考えてみる。

まず第 1 に、後に Fig. 3 に示すように、実験結果は  $E_x''$  と  $E_x'$  が  $\theta$  がある値に対して極値をとるような変化をするが、先の計算においてはそのような結果が得られていない点がある。第 2 に、 $E_x'$  と  $E_x''$  の計算結果のグラフの形状は、式 (20) からそれぞれ  $C_{11}'$ 、 $C_{11}''$  によって決まることがわかる。そこで式 (23)、(24) を見てみると、第 1 項と第 2 項はそれぞれ類似しているが、第 3 項が異なっており、これがグラフ形状の差違を作り出していると考えられる。さらに、第 3 項の違いは、式 (22) のように複素ポアソン比  $\nu_{LT}^*$  をおいたために、 $C_{11}'$ 、 $C_{11}''$  を求める時に、虚数部による項が消えてしまうことから生じている。これらの点を合わせて考えると、 $\nu_{LT}^*$  をどのような形で与えるのが適当であるのかを考える必要がある。

そこで次のように考えてみる。複合体の各部材の複素ポアソン比  $\nu^*$  がどちらの部材についても同じであるとして、それを次のように置く。

$$\nu^* = \nu' (1 + i \alpha) \quad (25)$$

この場合、 $G'$ 、 $G''$  については式 (21) ではなく次式を用いて求めることになる。

$$G' = \frac{E' (1 + \nu') + E'' \nu' \alpha}{2 \{ (1 + \nu')^2 + \nu'^2 \alpha^2 \}}$$

$$G'' = \frac{E'' (1 + \nu') - E' \nu' \alpha}{2 \{ (1 + \nu')^2 + \nu'^2 \alpha^2 \}} \quad (26)$$

また、 $\nu_{LT}^*$  は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\nu_{LT}^* &= \nu'(1+i\alpha)V_f + \nu'(1+i\alpha)V_m \\ &= \nu'(1+i\alpha) \\ (\because V_f + V_m &= 1)\end{aligned}\quad (27)$$

## 5. 複素弾性率 $E_x^*$ を直接的に求める方法

これまでの考え方においては、まず複素コンプライアンス  $C_{11}^*$  を求め、それから  $E_x^*$  を求めていたが、ここでは応力-ひずみ関係から直接的に  $E_x^*$  を求めることを考える。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^* \\ \sigma_y^* \\ \tau_{xy}^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}^* & E_{12}^* & E_{16}^* \\ E_{21}^* & E_{22}^* & E_{26}^* \\ E_{61}^* & E_{62}^* & E_{66}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

ここで、 $E^*$  は角度によって変化する複素弾性率である。このとき、 $x$  方向の複素応力  $\sigma_x^*$  は次式で表せる。

$$\sigma_x^* = E_{11}^* \varepsilon_x + E_{12}^* \varepsilon_y + E_{16}^* \gamma_{xy} \quad (29)$$

ここで、式(17)において  $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$  であることから

$$\varepsilon_x^* = C_{11}^* \sigma_x^*, \quad \varepsilon_y^* = C_{21}^* \sigma_x^*, \quad \gamma_{xy}^* = C_{61}^* \sigma_x^* \quad (30)$$

であり、ポアソン比  $\nu_{21}^*, \nu_{61}^*$  を

$$\nu_{21}^* = -\frac{\varepsilon_y^*}{\varepsilon_x^*} = -\frac{C_{21}^*}{C_{11}^*}, \quad \nu_{61}^* = \frac{\gamma_{xy}^*}{\varepsilon_x^*} = \frac{C_{61}^*}{C_{11}^*} \quad (31)$$

とすると<sup>3)</sup>、式(29)は次のように書き換えられる。

$$\sigma_x^* = [E_{11}^* - \nu_{21}^* E_{12}^* + \nu_{61}^* E_{16}^*] \varepsilon_x \quad (32)$$

よって、 $x$  方向の複素弾性率  $E_x^*$  として次式を得る。

$$E_x^* = E_{11}^* - \nu_{21}^* E_{12}^* + \nu_{61}^* E_{16}^* \quad (33)$$

ここで、慣用材料については  $\nu_{61}^*$  がほとんど現れないことからこれを無視して

$$E_x^* = E_{11}^* - \nu_{21}^* E_{12}^* \quad (34)$$

とした。さらに、この式の中の複素弾性率、およびポアソン比を求めるための複素コンプライアンスは次式により求められる。

$$\begin{aligned}C_{11}^* &= \frac{\cos^4 \theta}{E_L^*} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T^*} \\ &+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( -\frac{\nu_{LT}^*}{E_L^*} - \frac{\nu_{TL}^*}{E_T^*} + \frac{1}{G_{LT}^*} \right)\end{aligned}\quad (35)$$

$$\begin{aligned}C_{21}^* &= -\frac{\nu_{LT}^*}{E_L^*} \cos^4 \theta - \frac{\nu_{TL}^*}{E_T^*} \sin^4 \theta \\ &+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( \frac{1}{E_L^*} + \frac{1}{E_T^*} - \frac{1}{G_{LT}^*} \right)\end{aligned}\quad (36)$$

$$\begin{aligned}E_{11}^* &= \frac{E_L^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} \cos^4 \theta + \frac{E_T^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} \sin^4 \theta \\ &+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( \frac{E_L^* \nu_{TL}^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} + \frac{E_T^* \nu_{LT}^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} + 4G_{LT}^* \right)\end{aligned}\quad (37)$$

$$\begin{aligned}E_{12}^* &= \frac{E_L^* \nu_{TL}^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} \cos^4 \theta + \frac{E_T^* \nu_{LT}^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} \sin^4 \theta \\ &+ \cos^2 \theta \sin^2 \theta \left( \frac{E_L^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} + \frac{E_T^*}{1 - \nu_{LT}^* \nu_{TL}^*} - 4G_{LT}^* \right)\end{aligned}\quad (38)$$

## 6. 実験方法

次に、計算結果と比較するための実験として、2種類のゴムを積層し、積層方向と応力軸方向のなす角  $\theta$  を種々変えた場合について、損失正接  $\tan \delta$  と弾性係数  $E'$  を専用の測定機器によって求めた。なお、Photo 1 に示す白いゴムが軟らかいゴムに、黒いゴムが硬いゴムに、それぞれ対応している。実験方法は、Photo 1 に示す短冊状の試験片を長手方向に 10% 一軸伸長させた状態から  $\pm 2\%$  のひずみ振幅で強制振動を与えて測定した。振動周波数は 20 Hz、温度は 20 °C である。実験は2回行ったが、それらの実験結果はそれぞれ以下の通りである。なお、体積率の測定には画像処理を利用した。

### 6. 1 第1の実験

体積率： 白  $V_m = 0.565$ ,

黒  $V_f = 0.435$

実験結果を Table 1 に示す。

Table 1 Results of the first experiment

|               | White | Black | $\theta = 0^\circ$ | $20^\circ$ | $45^\circ$ | $90^\circ$ |
|---------------|-------|-------|--------------------|------------|------------|------------|
| $\tan \delta$ | 0.093 | 0.258 | 0.211              | 0.157      | 0.111      | 0.118      |
| $E'$          | 2.96  | 15.15 | 7.84               | 6.27       | 4.46       | 4.87       |
| $E''$         | 0.275 | 3.909 | 1.654              | 0.984      | 0.495      | 0.575      |

Table 2 Results of the second experiment (five experiments)

|      |            | White | Black  | $\theta = 0^\circ$ | $20^\circ$ | $45^\circ$ | $70^\circ$ | $90^\circ$ |
|------|------------|-------|--------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| $E'$ | Experiment | 2.771 | 14.969 | 8.181              | 6.269      | 4.114      | 4.306      | 4.452      |
|      |            | 2.851 | 15.574 | 7.613              | 6.731      | 4.268      | 4.396      | 4.480      |
|      |            | 2.751 | 14.484 | 7.631              | 5.711      | 4.323      | 4.464      | 4.554      |
|      |            | 2.760 | 14.913 | 7.965              | 6.188      | 4.442      | 4.349      | 4.472      |
|      |            | 2.735 | 15.957 | 7.909              | 6.468      | 4.349      | 4.631      | 4.438      |
|      | Average    | 2.774 | 15.179 | 7.860              | 6.273      | 4.299      | 4.429      | 4.479      |

|               |            | White  | Black  | $\theta = 0^\circ$ | $20^\circ$ | $45^\circ$ | $70^\circ$ | $90^\circ$ |
|---------------|------------|--------|--------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| $\tan \delta$ | Experiment | 0.0856 | 0.2531 | 0.2061             | 0.1665     | 0.1095     | 0.1187     | 0.1210     |
|               |            | 0.0859 | 0.2558 | 0.2049             | 0.1678     | 0.1060     | 0.1117     | 0.1181     |
|               |            | 0.0882 | 0.2445 | 0.2052             | 0.1582     | 0.1249     | 0.1106     | 0.1148     |
|               |            | 0.0884 | 0.2560 | 0.2048             | 0.1668     | 0.1011     | 0.1121     | 0.1175     |
|               |            | 0.0875 | 0.2548 | 0.2076             | 0.1612     | 0.1052     | 0.1155     | 0.1176     |
|               | Average    | 0.0871 | 0.2528 | 0.2057             | 0.1641     | 0.1093     | 0.1137     | 0.1178     |

Table 3 Results of the second experiment

|       | White | Black | $\theta = 0^\circ$ | $20^\circ$ | $45^\circ$ | $70^\circ$ | $90^\circ$ |
|-------|-------|-------|--------------------|------------|------------|------------|------------|
| $E''$ | 0.242 | 3.837 | 1.617              | 1.029      | 0.4699     | 0.5036     | 0.5276     |

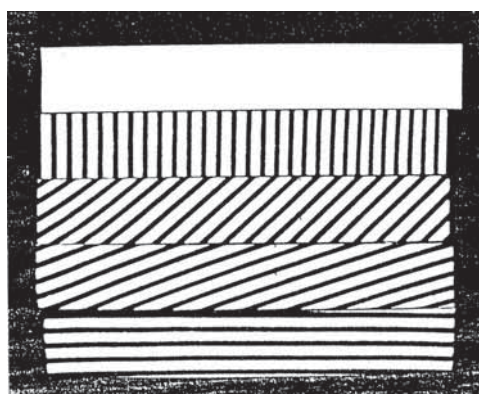


Photo 1 Test pieces of rubber composite plates with inclined layers

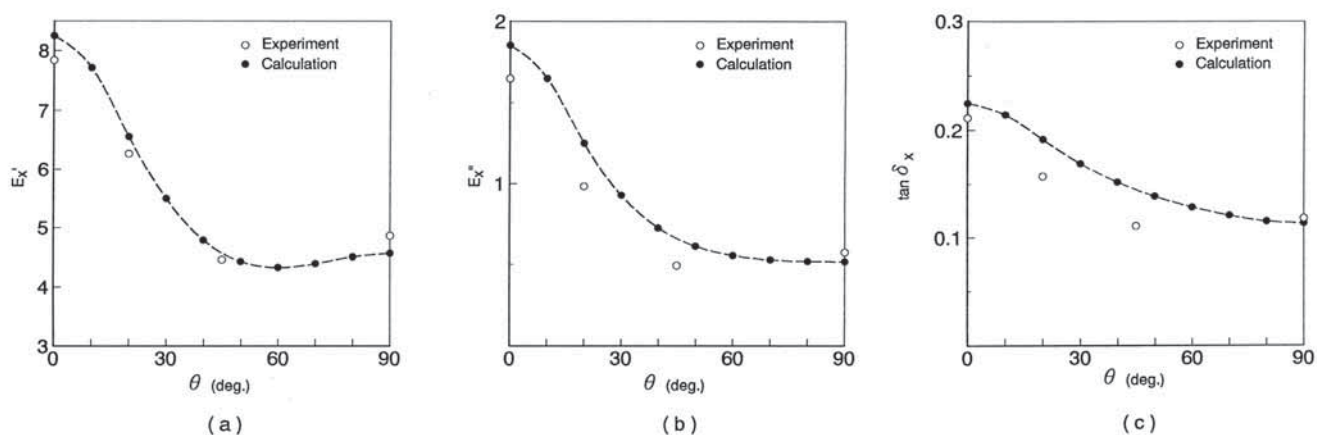


Fig. 2 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate  
[ The first experiment ]

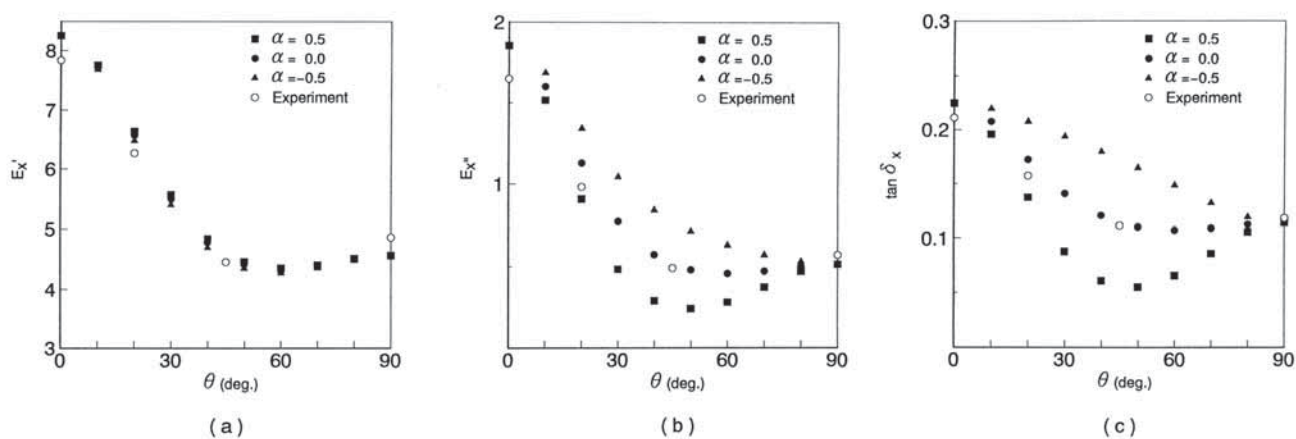


Fig. 3 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate and  
effect of Poisson's ratio [ The first experiment ]

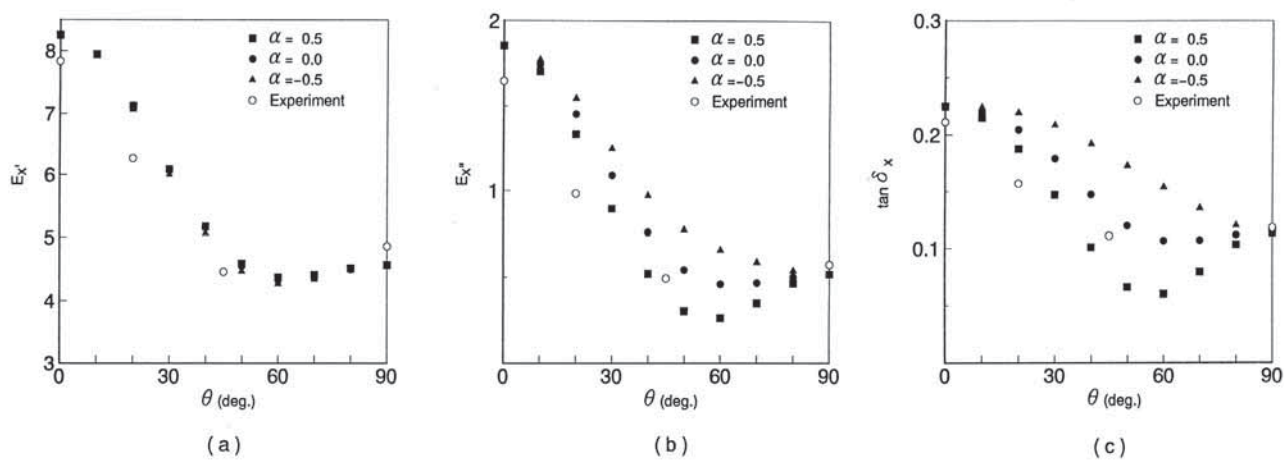


Fig. 4 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate and  
effect of Poisson's ratio calculated directly from complex elastic constants  
[ The first experiment ]



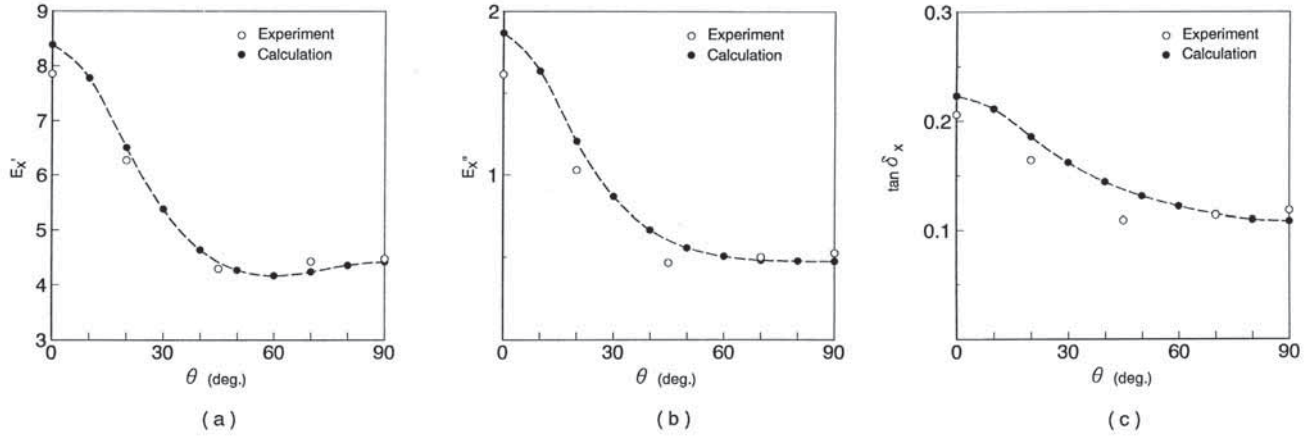


Fig. 5 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate  
[ The second experiment ]

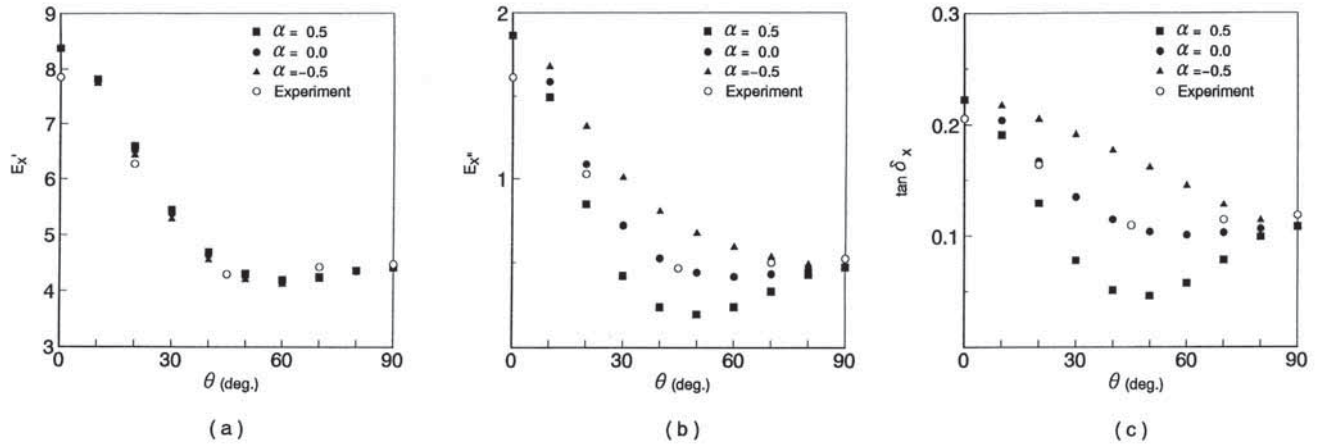


Fig. 6 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate and  
effect of Poisson's ratio [ The second experiment ]

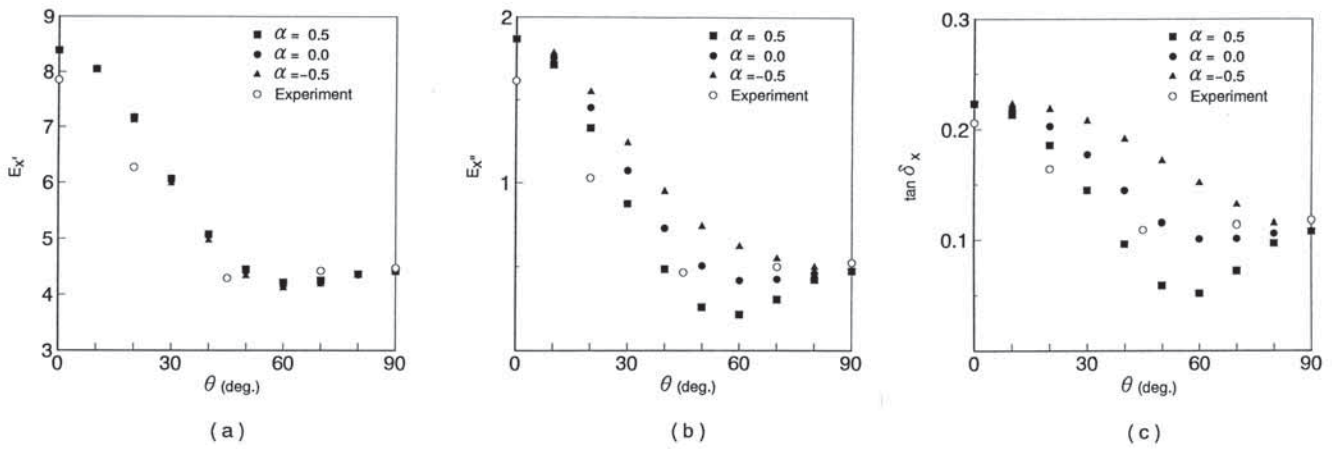


Fig. 7 Elastic constants and loss tangent of inclined composite rubber plate and  
effect of Poisson's ratio calculated directly from complex elastic constants  
[ The second experiment ]

## 6. 2 第2の実験

体積率： 白  $V_m = 0.547$ ,

黒  $V_f = 0.453$

実験結果を Table 2, 3 に、それぞれ示す。

## 7. 計算結果と実験結果の比較

### 7. 1 第1の実験結果との比較

まず、3章で求めた関係を用いて計算した結果と実験結果の比較を Fig. 2 (a)~(b) に示す。これらから、 $E'_x$  については実験結果と一致しているが、 $E''_x$  および  $\tan \delta$  については実験結果とはやや異なっていることがわかる。また、 $E'_x$  については  $\theta = 0^\circ$  の場合に比べて  $\theta = 90^\circ$  に近づくにつれて実験値よりも下回る結果となっていることがわかる。このことについて、2. 1 節の線形複合則においては  $\theta = 90^\circ$  の場合には両方の部材にかかる応力が一定であるとして計算されているが、実際の変形においては複合体の構成要素相互の変形の拘束によって、そのような状態から多少ずれていることが考えられる<sup>6)</sup>。したがって、 $\theta = 90^\circ$  の場合において1軸引張りにおける複合体の各部材の変形状態を静的および動的な場合について調べておく必要があると思われる。

次に、4章で求めた結果を用いて、3章と同様の計算を行った。その結果を Fig. 3 (a)~(b) に示す。これによると、 $E'_x$  は  $\alpha$  による影響をほとんど受けないが、 $E''_x$  は  $\alpha$  による影響を受け、それに伴って  $\tan \delta_x$  も変化している。また、 $\alpha = 0$  のときが実験結果に最もよく沿っていることから、3章の計算においては複素ポアソン比  $\nu^*$  は実数とみなすことができ、複素弾性率と同様の変換はしないと結論づけてもよいと考えられる。

なお、この点に関して、Tabaddor らの論文<sup>2)</sup>においてもポアソン比は実数として扱われているが、複素数で表示する方がよいと主張している報告<sup>4)</sup>もある。

この点について原理的に考えると、弾性率あるいはコンプライアンスは、応力とひずみの相互関係を規定するものであり、粘弾性体について複素数で表示することには妥当性があると考えられる。これに対して、ポアソン比はある方向のひずみと別の方向のひずみとの関係を規定するものであって、複素数を導入すべき必然性はないと考えられる。

さて、5章で述べた考え方を用いて、複素ポアソン比を4章のように、複素弾性率を用いて直接的に求める方法で計算した結果を Fig. 4 (a)~(c) に示す。こ

れらを見ると、複素コンプライアンスから求めた計算結果に比べると傾向は似ているが、あまりよい結果とは言えない。したがって、複素コンプライアンスを用いて計算する方が妥当な解が得られると考えられる。

### 7. 2 第2の実験結果との比較

以上の傾向を確認するため、第2の実験結果と計算結果の比較を Fig. 5 ~ 7 に示す。Fig. 5 ~ 7 に示される傾向は、Fig. 2 ~ 4 について述べた結果と同様な傾向を示しており、第1の実験結果に対する考察の妥当性を確認することができる。

## 8. 結 言

これまでの計算によって得られた結果をまとめると、次のようになる。

(1) 2種類のゴムからなる一方向配列複合体の、配列方向から  $\theta$  だけ傾いた1軸方向に対する複素弾性率および損失正接は、線形複合則の複素表示によって求められる。

(2) 複素ポアソン比は実数で計算すると実験結果とよく一致する結果が得られる。すなわち、ポアソン比に複素数を導入する必然性は見当たらなかった。

(3) 複素弾性率に直接複合則を当てはめて解を求めることも試みたが、結果は複素コンプライアンスを用いて求める方法の方が実験結果とのよい一致が得られた。

終わりに、本研究に協力された岡山大学工学部清水一郎博士に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 藤本邦彦, 加部和幸, 石上俊弥, FRPの複素弾性率に関する研究, 日本複合材料学会誌, **12**-4 (1986), pp. 163-170.
- 2) F. Tabaddor, S. K. Clark, R. N. Dodge and J. M. Perraut, Viscoelastic Loss Characteristics of Cord-Rubber Composites, Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 14, No. 2, April-June (1986), pp. 75-101.
- 3) S. W. Tsai and H. T. Hahn, 複合材料の強度解析と設計入門, (1986), 日刊工業新聞.
- 4) A. Agbossou, A. Benzarti, K. Benzarti and N. Alberola, J. Mat. Sci., **28** (1993), pp. 1963-1972.
- 5) 阿部武治, 橋爪雅彦, 武居邦彦, 越智 衛, 清水一郎, 長岐 滋, ゴム複合版の引張変形挙動, 材料, **45**-6 (1996), pp. 650-655.
- 6) 阿部武治, 三宅哲也, 不均質材料の弾性変形における変形拘束の解析, 津山高専紀要, **48** (2006), pp. 1-8.