研究論文

カーボン/ポリイミド複合材料における
引張機械的性質の統計的評価

下河 利行*, 濱口 泰正†, 角田 義秋‡, 三本木茂夫§, 森野 美樹||, 山本 昌孝¶

(1994年3月8日受付)

Statistical Evaluation of Tensile Mechanical Properties
of Carbon/Polyimide CompositesT. SHIMOKAWA,* Y. HAMAGUCHI,† Y. KAKUTA,‡ S. SANBONGI,§
Y. MORINO|| and M. YAMAMOTO¶

(Received March 8, 1994)

The objective of this study is to statistically evaluate tensile mechanical properties of two kinds of carbon/polyimide composites, i.e., Celion 6K/PMR-15 and T800H/PMR-15 with a quasi-isotropic stacking sequence. Tensile tests were conducted under room temperature using about thirty smooth specimens each. Mechanical properties measured are ultimate strength, failure strain, elastic modulus, and Poisson's ratio. Statistical analyses use four kinds of distribution models such as normal, log-normal, type-I extreme-value, and two-parameter Weibull distributions. These analyses derive the estimates of central tendencies and scatter parameters, and B allowables. Moreover, the modified Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test for the four kinds of distribution models is applied for the data of each mechanical property. Correlation between mutual mechanical properties is examined, and a multiple regression analysis applied to predict the ultimate strength.

*† 航空宇宙技術研究所機体部 (181 三鷹市大沢 6-13-1)

Airframe Division, National Aerospace Laboratory, 6-13-1 Ohsawa, Mitaka, Tokyo 181, Japan

* 疲労研究室長 Head of Fatigue Section

†‡ 主任研究官 Senior Research Engineers

§ 航空宇宙技術研究所構造力学部 (182 調布市深大寺東町 7-44-1)

Structural Mechanics Division, National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo 182, Japan

総括室長 Head of Engineering Section

|| 宇宙開発事業団システム技術開発部 (305 つくば市千現 2-1-1)

Systems Engineering Department, National Space Development Agency of Japan, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

主任開発部員 Senior Engineer

¶ 宇宙開発事業団宇宙往還システム室 (182 調布市深大寺東町 7-44-1)

Space Recovery Systems Office, National Space Development Agency of Japan, 7-44-1 Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo 182, Japan

主任開発部員 Senior Engineer

1. 緒 言

カーボン/ポリイミドは、耐熱性のあるプラスチック系複合材料である。使用温度範囲としては、1分間程度であれば 430~480°C から、10万時間を目標とすれば 180~230°C 程度までと考えられている。このような性質から、ミサイル、宇宙往還機、ジェット・エンジン部品、先進戦闘機、および超音速輸送機に対する有力な主構造用材料として期待されている。この材料による実構造開発の試みは一時活発に行われ、その成果が多数報告されている^{1,2)}。しかしながら、その後の進歩についてはほとんど公表されていない状況にある。また、この材料に関する機械的性質の研究発表は幾つか³⁻⁶⁾ 散見されるが、実用的データ^{7,8)} は少ない。

我が国において、この材料を主構造用材料として実用化するために本格的な材料評価に取組んだのは、航空宇宙技術研究所(航技研)と宇宙開発事業団が最初である⁹⁻¹²⁾。最近では、IHI でも評価試験が進められている¹³⁾。しかしながら、この材料を主構造用として実用化するためには、さらに多くの材料試験を蓄積すると同時に、これらの結果を検討しながら、材料そのものや製造

工程の改善を図り、より完成度の高い材料に成長させる必要がある。

航技研と宇宙開発事業団はカーボン/ポリイミド複合材料を無人宇宙往還機 HOPE (H-II Orbiting Plan E) の主構造に应用するため、共同で一連の評価試験を実施している。本研究はその一部として実施したものであり、繊維が異なる2種類のカーボン/ポリイミド複合材料について、多数の試験片を用いて引張試験を実施し、機械的性質に関する統計的データを導いたものである。また、得られたデータに対して解析を行い、機械的性質の統計的特性を明らかにした。ここではこれらの結果について報告する。なお、カーボン/ポリイミド複合材料について、ここで報告するようなデータと解析結果を公表した例は他に見当たらない。

2. 試験片と試験方法

使用した2種類のプリプレグ・システムは、ファイバークラフト社の Celion 6K/PMR-15 と T800H/PMR-15 である。プリプレグの公称厚さはそれぞれ 0.137 および 0.134 mm である。試験片の形状を Fig. 1 に示す。積層構成としては標準的な準等方積層 (45/0/-45/90)_s 32 プレイを採用した。供試材料の成形と試験片への加工は2社が担当し、Celion 6K/PMR-15 の場合がA社、T800H/PMR-15 の場合がB社である。

引張試験の際には、試験片中央部表裏の荷重方向とこれと直角方向に計4枚の歪ゲージを貼りつけ、荷重-歪関係を計測した。なお、補助的に試験片のクロスヘッド間の変位も計測した。試験環境は室温である。使用した試験片の数は、Celion 6K/PMR-15 の場合が31個、T800H/PMR-15 の場合が30個である。試験は Celion

6K/PMR-15 の場合が航技研で、T800H/PMR-15 の場合はB社で行った。測定項目は、試験片に対する板厚と板幅、引張試験による引張強度、破断歪、弾性係数、ポアソン比である。

3. 統計的解析方法

本研究では、機械的性質の分布モデルとして著者の一人が提唱しているように¹⁴⁾ 4種類の分布形を検討の対象とする。ここでは、これらの分布関数を示すとともに、その母数推定値とばらつきの指標、および設計で使用される MIL-HDBK-5F¹⁵⁾ に定義されているB許容値 (信頼度=1-P=90%, 信頼水準=1-γ=95%) の計算方法を示す。さらに、本研究で使用した各分布形への適合度検定法、各機械的性質相互の相関係数の計算法、および重回帰分析法を簡単に説明する。

3.1 4種類の分布関数とばらつきの指標

機械的性質の分布にあてはめる統計モデルとしては正規系の正規分布、対数正規分布、およびワイブル系の極値分布 (最小値の2重指数分布)、2母数ワイブル分布の計4種類とする。なお、2母数ワイブル分布は対数2重指数分布でもある。したがって、正規系分布とワイブル系分布の対応を考える際には、正規分布と極値分布、対数正規分布と2母数ワイブル分布がそれぞれ対応する。2母数分布を分布モデルとして採用するなら、この4種類を考えれば実用的には十分である。

3.1.1 正規分布

正規分布の場合、任意の機械的性質を x とすれば、 x の確率密度関数は

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 μ と σ はそれぞれ x の平均と標準偏差であり、正規分布の母数である。また、ばらつきの指標としては標準偏差を使用することもあるが、本研究では変動係数 η

$$\eta = \sigma / \mu \quad (2)$$

を使うものとする。

3.1.2 対数正規分布

対数正規分布の場合は、 $X = \log x$ の確率密度関数が正規分布となる。式(1)において、 x の代わりに X 、 μ の代わりに μ_L 、 σ の代わりに σ_L とおけばよい。したがって、母数は μ_L と σ_L であり、またばらつきの指標には σ_L を使用する。

3.1.3 極値分布 (最小値の2重指数分布)

本研究で使う極値分布の定義は、最小値の2重指数分

Fig. 1 Specimen configurations (in mm).

布を指すものとする。分布関数は

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{x - x_E}{b} \right) \right] \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 x_E と b はそれぞれ位置母数と尺度母数である。いま中央値を x_{ME} とすれば、

$$x_{ME} = x_E + b \cdot \ln(\ln 2) \quad (4)$$

で与えられる。正規分布における変動係数のように極値分布でも変動係数相当量を η_E とし、

$$\eta_E = b/x_{ME} \quad (5)$$

と定義する。これをばらつきの指標として使用する。

3.1.4 2 母数ワイブル分布

2 母数ワイブル分布における x の分布関数は

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/x_C)^\alpha] \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 x_C は尺度母数、 α は形状母数である。いま、 $X = \ln x$ 、 $X_E = \ln x_C$ 、 $b = 1/\alpha$ とおけば、式(6)は式(3)に一致する。このために、2 母数ワイブル分布は対数 2 重指数分布とも呼ばれる。ばらつきの指標は α で表される。

3.2 4 種類の分布モデルに対する母数推定法

本研究で使用する母数推定法を述べる。いま、試験個数を n とする。変数 x の観測値を小さいほうから並べ、順序番号 i をつけて表すものとする。なお、数式表示を簡略にするため、 $\sum_{i=1}^n$ を単に Σ で表すことにする。

3.2.1 正規系分布の場合

正規分布に対しては、標本平均 $\bar{x}$ と標本標準偏差 s

$$\bar{x} = (\Sigma x_i)/n \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\{\Sigma (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)\}} \quad (8)$$

を母数の推定値として使う。一方、ばらつきの指標である変動係数の推定値は、これらを式(2)に代入して得られる。

対数正規分布の場合には、 x の代わりに $X = \log x$ を用いて計算すればよい。中央値は、式(7)により対数平均 $\bar{X}$ を求めて真数に直した値で表す。ばらつきの指標には式(8)に X_i と $\bar{X}$ を代入し、標本対数標準偏差 s_L を計算して用いる。

3.2.2 ワイブル系分布の場合

極値分布と 2 母数ワイブル分布に対しては、それぞれの確率紙上にメジアンランクを使用して観測値をプロットし、最小 2 乗法により母数を推定するものとする。いまメジアンランクが与える累積確率を P_i とする。ここで、 E_i とその平均 $\bar{E}$ を

$$E_i = \ln \{ \ln [1 / (1 - P_i)] \} \quad (9)$$

$$\bar{E} = \Sigma E_i / n \quad (10)$$

とおく。

極値分布の場合、尺度母数と位置母数それぞれの推定量 $\hat{b}$ および $\hat{x}_E$ は

$$\hat{b} = (\Sigma x_i \cdot E_i - n \bar{x} \bar{E}) / (\Sigma E_i^2 - n \bar{E}^2) \quad (11)$$

$$\hat{x}_E = \bar{x} - \hat{b} \bar{E} \quad (12)$$

で与えられる。したがって、中央値の推定値 $\hat{x}_{ME}$ は得られた $\hat{b}$ 、 $\hat{x}_E$ を式(4)に代入して得られる。これにより変動係数相当量の推定値 $\hat{\eta}_E$ も式(5)により計算できる。

2 母数ワイブル分布の場合、 x の代わりに $X = \ln x$ において、式(11)と(12)により $\hat{b}$ と $\hat{X}_E$ を求める。すると、2 母数ワイブル分布の形状母数 α 、尺度母数 x_C 、および中央値 x_{MW} の推定値はそれぞれ、 $\hat{\alpha} = 1/\hat{b}$ 、 $\hat{x}_C = \exp(\hat{X}_E)$ 、 $\hat{x}_{MW} = \hat{x}_C (\ln 2)^{1/\hat{\alpha}}$ により計算できる。

3.3 B 許容値の計算法

3.3.1 正規系分布の場合

正規分布に対する B 許容値 x_B は、式(7)、(8)を用いて

$$x_B = \bar{x} - k \cdot s \quad (13)$$

により導かれる。ここで、 k は片側許容限係数であり測定個数 n 、信頼度 $1-P$ 、信頼水準 $1-\gamma$ の関数であり、統計数値表¹⁰⁾に掲載されている。

対数正規分布の場合には、 $\log x$ についての B 許容値を導き、真数に直した値を採用すればよい。

3.3.2 ワイブル系分布の場合

極値分布と 2 母数ワイブル分布に対する B 許容値の計算には、本研究では母数の推定方法がメジアンランクと最小 2 乗法を使用しているから、著者の一人が与えた数表¹⁷⁾を使用することができる。片側許容限界を計算するためには $V_P(1-\gamma)$ の数表を利用する。

極値分布の場合には、式(11)と(12)による計算値を使用して、

$$x_B = \hat{x}_E - \hat{b} \cdot V_P(1-\gamma) \quad (14)$$

により計算される。

2 母数ワイブル分布の場合には、 $X = \ln x$ において、 $\hat{X}_E$ と $\hat{b}$ を導き、

$$x_{WB} = \exp \{ \hat{X}_E - \hat{b} \cdot V_P(1-\gamma) \} \quad (15)$$

により計算する。

3.4 修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定

統計的分布モデルへの適合性を検討するために、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定を使う。母数が未知の場合、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の統計量 D_n は、両側検定の表現式

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} (\delta_i) \quad (16)$$

$$\delta_i = \max[\Phi(x_i; \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2) - (i-1)/n, i/n - \Phi(x_i; \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)] \quad (17)$$

で表される¹⁸⁾。ここで、 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ は母数の推定値、 $\Phi(\cdot)$ は分布関数を表す。なお、4種類の分布モデルそれぞれに対する適合度検定を行うためには、著者の一人が与えた D_n の限界値¹⁹⁾を使用すればよい。

3.5 相関係数

各機械的性質間の相関関係を調べるために相関係数を計算する。大きさの順を i で、2種の観測値を x_i, y_i で表すと、2変数 x, y の相関係数 r_{xy} は

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

で与えられる。ここで、 $\bar{x}, \bar{y}$ はそれぞれ平均値である。

3.6 重回帰分析

本研究では、あまり例のない試みとして三つの機械的

性質間の関係に対し重回帰分析を適用してみる。いま、一つの性質が二つの変数に依存するとして、目的変数を z 、2種の説明変数を x, y で表す。すると重回帰式は

$$z = a + b_1x + b_2y \quad (19)$$

で与えられる。ここで、 a は切片、 b_1, b_2 は偏回帰係数と呼ばれる。いま、 x の標準偏差 s_x を

$$s_x = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / n} \quad (20)$$

とおけば、 b_1, b_2, a はそれぞれ

$$b_1 = \frac{s_z}{s_x} \cdot \frac{r_{zx} - r_{xy}r_{yz}}{1 - r_{xy}^2} \quad (21)$$

$$b_2 = \frac{s_z}{s_y} \cdot \frac{r_{zy} - r_{xy}r_{xz}}{1 - r_{xy}^2} \quad (22)$$

$$a = \bar{z} - b_1\bar{x} - b_2\bar{y} \quad (23)$$

で与えられる。なお、 s および r につけたサフィックスはそれぞれの変数に対応する数式を意味する。

ここで、重相関係数 R_m は

Fig. 2 Distributions of the mechanical properties and specimen thickness of a Celion 6K/PMR-15 laminate plotted on normal probability paper.

$$R_m = \sqrt{\frac{r_{xx}^2 + r_{yy}^2 - 2r_{xx}r_{yy}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2}} \quad (24)$$

により計算できる。

4. 試験結果と解析

4.1 試験結果

試験結果は、実用的見地からプリプレグの公称厚さにより計算した板厚を用いて整理した。したがって、各機械的性質は公称値である。引張試験により得られた結果を、メジアンランクを使用して正規確率紙にプロットし、Celion 6K/PMR-15 の場合を Fig. 2, T800H/PMR-15 の場合を Fig. 3 に示す。引張強度、破断歪、弾性係数、およびポアソン比は、どちらの材料についても測定した。

これらの図から、正規分布に対する適合度は Celion 6K/PMR-15 の弾性係数の場合のみよくないが、その他

の場合は正規分布として解析しても妥当な結果と考えられる。4種類の分布形に対する定量的適合度については後記するが、この点については定量的にも裏付けられる。

4.2 代表値、ばらつき、およびB許容値

Table 1 に Celion 6K/PMR-15 の機械的性質と板厚の代表値、ばらつき、およびB許容値の計算結果を、Table 2 に T800H/PMR-15 の場合の結果を示す。引張強度、破断歪、弾性係数のいずれかに対しても、代表値すなわち平均、中央値、位置母数、あるいは尺度母数によって比べると、新世代のカーボン繊維を使用した T800H/PMR-15 は Celion 6K/PMR-15 に比べて非常に優れた結果を示している。また、ばらつきを変動係数により比べると、破断歪の場合は T800H/PMR-15 の場合が Celion 6K/PMR-15 の場合の約 1.8 倍と少々大きい。これ以外は同等とみなせる。ポアソン比の代表値

Fig. 3 Distributions of the mechanical properties of a T800H/PMR-15 laminate plotted on normal probability paper.

Table 1 Central tendencies, scatter parameters, and B allowables of mechanical properties and specimen thickness in a Celion 6K/PMR-15 laminate.

Parameter estimates (Sample size n=31)		Tensile strength S_u (MPa)	Failure strain ϵ_f (μ strain)	Elastic modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Thickness t (mm)
Median in data		616.7	13150	47.62	0.308	4.985
Normal	Mean	613.1	13240	47.05	0.307	4.989
	Standard deviation	33.19	513.3	1.774	0.0129	0.0951
	Coefficient of variation (%)	5.41	3.88	3.77	4.22	1.91
	B allowable	554.5	12330	43.91		
Log-normal	Log-mean	2.7869	4.1214	1.6723	-0.514	0.6979
	Median	612.3	13230	47.02	0.306	4.988
	Log-standard-deviation	0.02335	0.01651	0.01663	0.0185	0.00823
	B allowable	556.8	12370	43.94		
Extreme-value	Location parameter	627.3	13450	47.86	0.313	5.030
	Median	617.9	13310	47.32	0.309	5.003
	Scale parameter	25.58	377.2	1.460	0.0107	0.07393
	Equivalent CV (%)	4.14	2.83	3.09	3.46	1.48
	B allowable	547.7	12270	43.32		
2P-Weibull	Scale parameter	626.6	13440	47.85	0.312	5.029
	Median	617.1	13300	47.30	0.308	5.002
	Shape parameter	23.98	35.35	31.73	28.3	67.55
	B allowable	550.4	12300	43.38		

Table 2 Central tendencies, scatter parameters, and B allowables of mechanical properties in a T800H/PMR-15 laminate.

Parameter estimates (Sample size n=30)		Tensile strength S_u (MPa)	Failure strain ϵ_f (μ strain)	Elastic modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Median in data		790.6	15300	54.04	0.301
Normal	Mean	789.9	15340	54.36	0.303
	Standard deviation	43.23	1057	1.647	0.00889
	Coefficient of variation (%)	5.47	6.89	3.03	2.94
	B allowable	713.1	13460	51.43	
Log-normal	Log-mean	2.8969	4.1847	1.7351	-0.519
	Median	788.7	15300	54.34	0.303
	Log-standard-deviation	0.02404	0.02980	0.01300	0.0126
	B allowable	714.8	13550	51.52	
Extreme-value	Location parameter	809.6	15790	55.05	0.307
	Median	796.6	15490	54.59	0.304
	Scale parameter	35.55	818.7	1.246	0.00685
	Equivalent CV (%)	4.46	5.29	2.28	2.25
	B allowable	698.4	13230	51.16	
2P-Weibull	Scale parameter	808.9	15760	55.03	0.307
	Median	795.5	15460	54.57	0.304
	Shape parameter	21.89	18.70	43.80	44.3
	B allowable	701.3	13330	51.24	

とばらつきについてはほぼ同等とみなせる。

正規分布における B 許容値の片側許容限係数¹⁶⁾は、 $k_B=1.777$ ($n=30$), 1.767 ($n=31$) である。また、極値分布における B 許容値を計算するための V 値¹⁷⁾は、 $V_{0.1}(0.95)=3.127$ ($n=30$), 3.111 ($n=31$) である。

これらを用いて Table 1, 2 に示す B 許容値を導いた。これらの B 許容値を見ると、極値分布を仮定する場合は最も小さい値となり、2 母数ワイブル分布、正規分布、対数正規分布の順で大きくなる。ただし、あまり大きな差はない。

Table 3 Calculation of the modified Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test statistics for the data of a Celion 6K/PMR-15 laminate.

Distribution model (Sample size n=31)	Tensile strength S_u	Failure strain ϵ_f	Elastic modulus E	Poisson's ratio ν	Thickness t
Normal	0.137	0.109	0.157	0.113	0.097
Log-normal	0.136	0.102	0.162	0.117	0.093
Extreme-value	0.166	0.174	0.103	0.094	0.152
2P-Weibull	0.164	0.166	0.106	0.086	0.148

4.3 各機械的性質の4種類の分布モデルに対する適合度評価

ここでは4種類の分布形に対して、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の統計量により相対的な適合度を比較するとともに、各分布形に対する適合度を検定する。式(16)により計算された D_n の値を Table 3, 4 に示す。これらの表において D_n 値の小さいほうがあてはまりが良いと判定する。Table 1 と 2 に示したようにいずれの特性も統計的分布としてのばらつきは余り大きくないので、もとの変数による分布と対数変換した分布、すなわち正規分布に対する対数正規分布、極値分布に対する2母数ワイブル分布とではそれぞれあまり大きな差がないことがわかる。Table 3, 4 を見ると、ワイブル系分布が正規系分布よりあてはまりが良いのは、Celion 6K/PMR-15 の弾性係数とポアソン比のみである。T800H/PMR-15 の場合は、弾性係数とポアソン比についても正規系分布のほうがあてはまりが良いことがわかる。以上の点と分布形も標本ごとにばらつくことの両方を考慮すると、全体的に正規系分布をあてはめても妥当であるように思われる。正規分布と対数正規分布の選択については、差が小さいのでどちらを選択してもよいと思われるが、正規分布を選択するほうが取り扱いが容易である。

なお、有意水準 5% に対応する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の限界値¹⁹⁾ は、試験個数 $n=30$ および 31 の場合、正規系分布に対してそれぞれ 0.159 および 0.156、ワイブル系分布に対してそれぞれ 0.163 および 0.161 である。この値以上になれば棄却される。Table 3, 4 を見ると棄却されるものはいくつか存在し、数値に下線を引いて示した。

前記したように、Fig. 2, 3 には各機械的性質と試験片厚さの分布を正規確率紙にプロットして示した。このように、確率紙にデータをプロットして適合度を直感的に判定することも一般的である。ここでは紙面の都合で、4種類の確率紙にプロットしたグラフを掲載できな

Table 4 Calculation of the modified Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test statistic for the data of a T800H/PMR-15 laminate.

Distribution model (Sample size n=30)	Tensile strength S_u	Failure strain ϵ_f	Elastic modulus E	Poisson's ratio ν
Normal	0.077	0.141	0.154	0.126
Log-normal	0.084	0.138	0.148	0.123
Extreme-value	0.136	0.172	0.212	0.185
2P-Weibull	0.126	0.168	0.205	0.181

いが、上記のようにそれぞれのデータは正規と対数正規確率紙、あるいは極値とワイブル確率紙それぞれの上での適合度はほとんど違いがなかった。なお、Table 3, 4 においてワイブル系の分布にあてはまりの良い場合、すなわち、Celion 6K/PMR-15 の弾性係数とポアソン比の場合のデータ分布は、正規確率紙上で右斜め下向きに凸の形状となることがわかる。

4.4 機械的性質間における相関関係の検討

機械的性質間の関連を調べるために、相関関係を計算する。得られた相関係数行列を Table 5, 6 に示す。相関係数の比較的大きいものは、Celion 6K/PMR-15 の場合、引張強度と破断歪、引張強度と弾性係数の関係である。一方、T800H/PMR-15 の場合は引張強度と破断歪の関係のみである。引張強度と弾性係数の関係については、共通な相関が得られていない。また、圧縮強度の場合には比較的影響が大きいと考えられた板厚との関係²⁰⁾

Table 5 Correlation coefficient matrix for the data of a Celion 6K/PMR-15 laminate.

	Tensile strength S_u	Failure strain ϵ_f	Elastic modulus E	Poisson's ratio ν	Thickness t
S_u	1.000				
ϵ_f	0.704	1.000			
E	0.736	0.047	1.000		
ν	0.459	0.251	0.429	1.000	
t	0.138	0.143	0.063	-0.135	1.000

Table 6 Correlation coefficient matrix for the data of a T800H/PMR-15 laminate.

	Tensile strength S_u	Failure strain ϵ_f	Elastic modulus E	Poisson's ratio ν
S_u	1.000			
ϵ_f	0.608	1.000		
E	0.233	-0.471	1.000	
ν	0.145	0.007	0.207	1.000

については, Celion 6K/PMR-15 の引張強度と板厚との関係をみると, 相関が小さいことがわかる. なおここでは, 相関係数の比較的大きい場合を含む引張強度と破断歪および弾性係数との関係を Fig. 4, 5 に示す. 図上には, 破断歪または弾性係数を独立変数, 引張強度を従属変数とした回帰直線を描いて示す. これらの図により両者の相関の様子を理解できる.

4.5 重回帰分析

上記したように, 引張強度と破断歪, 引張強度と弾性係数の相関関係が比較的大きいことがわかった. そこ

で, ここでは引張強度の予測を目的として, 破断歪と弾性係数により引張強度が導かれるとして重回帰分析を試みる. もちろん引張強度と破断歪は同時に起きる事象であるから, どちらが目的変数でどちらが説明変数であるとは言えないが, このように仮定して議論する.

式(19)において, 引張強度を z , 破断歪を x , 弾性係数を y とおく. 上記した相関係数行列と式(20)による標準偏差を計算し, a , b_1 , b_2 , および重相関係数を導き, Table 7 に示す. また, Fig. 6(a)と(b)にはこれらの回帰式を使い, 予測値と実験値との比較を示す. Celion 6K/PMR-15 の場合の重相関係数が約1であるから, 破断歪と弾性係数の2変数による関数として表される引張強度は, 予測値と実験値がよく合うことがわかる. これは Fig. 6(a) に示したとおりである. また Fig. 4 と比較すると, 予測直線からのデータのちらばりが非常に小さいことがわかる. 一方, T800H/PMR-15 の場合は, 0.85 であるから Celion 6K/PMR-15 の場合より劣るが, 一つの変数の関数とした Table 6 の場合に比べて大幅に

Fig. 4 Correlation between the mechanical properties of a Celion 6K/PMR-15 laminate.

Fig. 5 Correlation between the mechanical properties of a T800H/PMR-15 laminate.

Fig. 6 Strength prediction by multiple regression analysis for both materials.

Table 7 Results of multiple regression analysis.

Material	Regression coefficients			MCC* R_m
	a	b_1	b_2	
Celion 6K/PMR-15	-581.1	0.04337	13.18	0.9953
T800H/PMR-15	-743.5	0.03777	17.55	0.8469

*Multiple correlation coefficient.

改善されている。これは Fig. 5 と Fig. 6(b) を比較することによっても理解できる。

5. 結 言

2種類のカーボン/ポリイミド準等方積層複合材料平滑試験片について、室温で統計的引張試験を行い、機械的性質の統計的な特性を調べた。得られた結論の主なものを以下に挙げる。

(1) 引張強度、破断歪、および弾性係数の代表値について、T800H/PMR-15はCelion 6K/PMR-15に比べて非常に優れた結果を示した。これらのばらつきを変動係数により比べると、破断歪の場合はT800H/PMR-15のほうがCelion 6K/PMR-15の場合より大きい。これ以外は同等とみなせた。ポアソン比については、代表値、ばらつきともに同等とみなせた。

(2) 引張強度、弾性係数、および破断歪のB許容値を分布モデル別に導いたところ、極値分布を仮定する場合が最も小さく、2母数ワイブル分布、正規分布、対数正規分布の順で大きくなる。ただし、互いにあまり大きな差はなかった。

(3) 各機械的性質の4種類の分布モデルへの適合度を検討した結果、正規系の正規分布と対数正規分布との差、およびワイブル系の極値分布と2母数ワイブル分布

との差はそれぞれあまり大きくなかった。

(4) 正規系分布とワイブル系分布への適合度の比較では、ワイブル系分布が正規系分布よりあてはまりが良いのは、Celion 6K/PMR-15の弾性係数とポアソン比のみであり、他の場合は正規系分布のほうがよりよくあてはまった。全体的に正規分布をあてはめることは妥当であると考えられた。

(5) 相関係数が比較的大きいのは、Celion 6K/PMR-15の場合、引張強度と破断歪、引張強度と弾性係数の関係であり、T800H/PMR-15の場合は、引張強度と破断歪の関係のみであった。

(6) 引張強度は破断歪と弾性係数に依存すると仮定して、重回帰分析を実施した結果、Celion 6K/PMR-15の場合の重相関係数は約1であり、T800H/PMR-15の場合は、0.85であった。すなわち、2種の材料について重回帰分析により導いた引張強度の予測式は実験値と比較的よく一致した。

本研究を遂行するにあたり、富士重工の菊川広繁氏から各種のご助言を頂いた。ここに厚く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) H.B. Dexter & J.G. Davis, Jr., eds.: *Graphite/Polyimide Composites*, NASA CP 2079 (1979).
- 2) *High Temperature Polymer Matrix Composites*, NASA CP-2385 (1985).
- 3) T.T. Serafini & M.P. Hanson: *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, N.R. Adsit, ed. (1982), pp. 5-19.
- 4) S.C. Kunz: *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, N.R. Adsit, ed. (1982),

- pp. 33-53.
- 5) D.P. Garber, D.H. Morris & R.A. Everett, Jr. : *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, N.R. Adsit, ed. (1982), pp. 73-91.
 - 6) J.B. Nelson : *Long-Term Behavior of Composites*, ASTM STP 813, T.K. O'Brien, ed. (1983), pp. 206-221.
 - 7) S.F. McCleskey, J.B. Cushman & D.E. Skoumal : AIAA Paper 82-0707, Proc. SDM Conf. (1982), pp. 212-222.
 - 8) D.W. Wilson, R.B. Pipes, D. Riegner & J. Webster : *Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites*, ASTM STP 734, C.C. Chamis, ed. (1981), pp. 195-207.
 - 9) 角田義秋, 濱口泰正, 野口義男, 三本木茂夫, 下河利行, 松下 正, 山本昌孝, 渥美基広 : 第 31 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会・日本機械学会 (1989), pp. 56-59.
 - 10) 濱口泰正, 下河利行, 三本木茂夫, 角田義秋, 野口義男, 松下 正, 山本昌孝, 渥美基広 : 第 31 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会・日本機械学会 (1989), pp. 60-63.
 - 11) 下河利行, 濱口泰正, 三本木茂夫, 角田義秋, 野口義男, 松下 正, 山本昌孝, 渥美基広 : 第 31 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会・日本機械学会 (1989), pp. 64-67.
 - 12) 三本木茂夫 : 第 31 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会・日本機械学会 (1989), pp. 68-71.
 - 13) 富岡史城, 夏村 匡 : 第 18 回複合材料シンポジウム講演要旨集, 日本複合材料学会 (1993), pp. 87-90.
 - 14) 下河利行 : 実製品の信頼性創造技術シンポジウム講演論文集 No. 910-49, 日本機械学会 (1991), pp. 1-6.
 - 15) MIL-HDBK-5F, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*, Department of Defense, U.S.A. (1990).
 - 16) 山内二郎他編 : 統計数値表, JSA-1972, 日本規格協会 (1972).
 - 17) 下河利行 : 材料, 41, 468 (1992), 1446-1451.
 - 18) N.R. Mann, R.E. Schafer & N.D. Singpurwalla : *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, John Wiley & Sons, New York (1974), p. 349.
 - 19) 下河利行 : 材料, 39, 436 (1990), 45-49.
 - 20) 濱口泰正, 下河利行, 角田義秋 : 第 34 回構造強度に関する講演会講演集, 日本航空宇宙学会・日本機械学会 (1992), pp. 286-289.