

ISSN 0389-4010

UDC 519.23

620.1

620.168

620.17

620.22

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1238

カーボン／ポリイミド複合材料引張機械的性質 データの統計的解析

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6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

カーボン／ポリイミド複合材料引張機械的性質 データの統計的解析*

下 河 利 行^{*1} 濱 口 泰 正^{*1} 角 田 義 秋^{*1}
三 本 木 茂 夫^{*2} 森 野 美 樹^{*3} 山 本 昌 孝^{*4}

Statistical Analysis of Tensile Mechanical Property Data of Carbon/Polyimide Composites *

Toshiyuki SHIMOKAWA^{*1}, Yasumasa HAMAGUCHI^{*1}, Yoshiaki KAKUTA^{*1},
Shigeo SANBONGI^{*2}, Yoshiki MORINO^{*3}, and Masataka YAMAMOTO^{*4}

ABSTRACT

The objective of this study is to statistically evaluate the 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 the 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. The modified Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit tests and graphical plotting techniques are applied to test the goodness-of-fit of each mechanical property data for the four kinds of distribution models. Correlation between mutual mechanical properties is examined, and a multiple regression analysis is applied to predict the ultimate strength. Moreover, a simple equation to predict the ultimate strength is derived using the product of the failure strain and elastic modulus.

Key Words : Carbon/polyimide composites, Tensile mechanical properties, Statistical analysis, Parameter estimates, B allowables, Modified Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test, Graphical plotting, Correlation, Multiple regression analysis, Strength prediction equation.

概 要

本研究の目的は、2種類のカーボン／ポリイミド、Celion 6K/PMR-15とT800H/PMR-15準等方積層複合材料について、引張機械的性質を統計的に評価することである。2種の材料それぞれ約30個の平滑試験片を用い、室温において引張試験を実施した。調べた機械的性質は引張強度、破断歪、弾性係数、ポアソン比である。統計的解析に使用した分布モデルは、正規分布、対数正規分布、極値分布（最小値の2重指数分布）、および

* 平成6年4月26日受付 (Received 26 April 1994)

*1 機体部 (Airframe Division)

*2 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

*3 宇宙開発事業団 システム技術開発部 (Systems Engineering Department, National Space Development Agency)

*4 宇宙開発事業団 宇宙往還システム室 (Space Recovery Systems Office, National Space Development Agency)

2 母数ワイブル分布の 4 種類である。これらの分布形に対して、各機械的性質の代表値、ばらつきの大きさ、ならびに B 許容値を計算した。さらに、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定と確率紙上にデータをプロットすることにより、機械的性質データそれぞれの 4 種類の分布モデルに対する適合度を検討した。また、各機械的性質相互間の相関を検討し、引張強度を予測するための重回帰分析を試みた。さらに、破断歪と弾性係数の積を使用した引張強度の簡易予測式を導いた。

1. 結 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℃ から、10 万時間を目標とすれば 180~230℃ 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り組んだのは、航空宇宙技術研究所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。

航空宇宙技術研究所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) の主構造に応用するため、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行い、機械的性質に関する統計的データを導いた。また、得られたデータを統計的に解析し、機械的性質の統計的特性を明らかにした。すなわち、代表値、ばらつき、B 許容値、分布形の適合度、相関関係、重回帰分析、並びに強度予測式等について検討した。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。また、ワイブル系分布に対する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定や B 許容値の計算には著者の一人が新たに導いた数表を使用している点も新規である。さらに、複合材料の機械的性質の解析に重回帰分析を使用した例も著者らの知る限りでは見当たらない。

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、ファイバライト社の 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。試験片の形状を図 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)_{4s} の 32 プライを採用した。供試材料の成形と試験片への加工は 2 社が担当しており、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。使用した試験片の個数は、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 の場合が航空宇宙技術研究所で、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。なお、弾性係数は応力-歪線図において、歪量 0.1%(1000 μ strain) と 0.6%(6000 μ strain) の間を線形であるとして計算した。

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^{14,15)} 4 種類の分布形を検討の対象

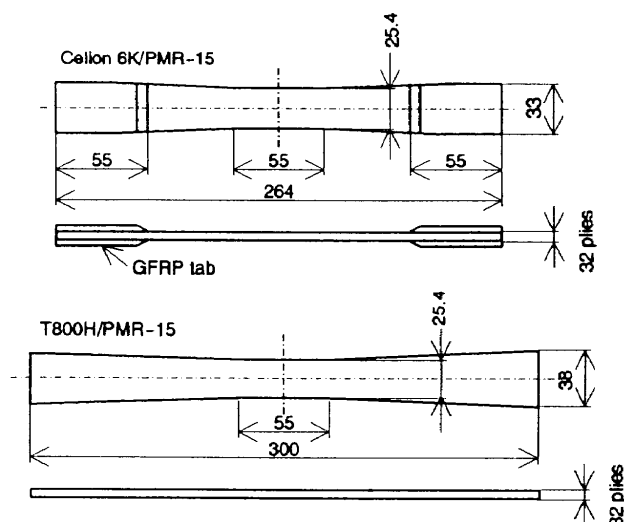


図 1 試験片の形状, 単位 mm

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、および構造設計に使用される MIL-HDBK-5F¹⁶⁾ に定義されている B 許容値 (信頼度 = 1-P = 90%, 信頼水準 = 1-r = 95%) を計算する方法について示す。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述べておく。

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後記するように対数 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場合には、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 の代りに X 、 μ の代りに μ_L 、 σ の代りに σ_L とおけばよい。ここで、 μ_L と σ_L はそれぞれ X の平均と標準偏差であり、対数正規分布の母数である。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 τ_E とし、

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

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 の観測値を小さい方から並べ、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 $\hat{\tau}_E$ も式(5)により計算できる。

2 母数ワイブル分布の場合は、 x の代りに $X = \ln x$ 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 $\hat{\alpha} = 1/\hat{b}$ 、 $\hat{x}_C = \exp(\hat{X}_E)$ 、 $\hat{x}_{MW} = \hat{x}_C \cdot (\ln 2)^{1/\hat{\alpha}}$ 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)を使い

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

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 $1-r$ の関数であり、統計数値表¹⁷⁾に掲載されている。

対数正規分布の場合は、 $X=\log x$ 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¹⁸⁾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 $V_P(1-r)$ の数表を利用する。

極値分布の場合は、式(11)と(12)による計算値を使用し、

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

により計算される。

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

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

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

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

$$\delta_i = \max [\Phi(x_i; \theta_1, \theta_2) - (i-1)/n, i/n - \Phi(x_i; \theta_1, \theta_2)] \quad (17)$$

で表される¹⁹⁾。ここで、 θ_1, θ_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²⁰⁾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、余り馴染み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

$$z = a + b_1 x + b_2 y \quad (19)$$

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

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

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

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

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。また、 \bar{z} は z の平均値を示す。

一方、重相関係数 R_m は

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

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示している。試験により得られた結果を、Celion 6K/PMR-15の場合を表1に、T800H/PMR-15の場合を表2に示す。引張強度、破断歪、弾性係数、およびポアソン比については、どちらの材料に対しても測定した。板厚については、Celion 6K/PMR-15の場合のみである。

4.2 代表値、ばらつき、およびB許容値

Celion 6K/PMR-15の場合における代表値、ばらつき、およびB許容値の計算結果を表3に示す。T800H/PMR-15の場合の結果は表4に示す。引張強度、破断歪、弾性係数のいずれに対しても、代表値すなわち平均、中央値、位置母数、あるいは尺度母数を比べると、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。またばらつきを正規分布の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とばらつきについてはほぼ同等とみなせる。

正規分布のB許容値に対応する片側許容限係数¹⁷⁾は、 $k_B = 1.777$ ($n=30$)、 1.767 ($n=31$)である。また、極値分布に

表 1 Celion 6K/PMR-15の引張試験結果と試験片厚さ

Number	Tensile strength	Failure strain	Elastic modulus	Poisson's ratio	Thickness
No.	S_u (MPa)	ϵ_f (μ strain)	E (GPa)	ν	t (mm)
1	641.5	13280	48.93	0.312	4.985
2	618.4	13320	48.99	0.316	4.898
3	573.8	12620	46.04	0.308	5.088
4	586.3	13000	46.01	0.316	4.935
5	605.3	12900	47.64	0.284	4.924
6	669.1	14300	48.00	0.328	4.906
7	621.4	12800	49.07	0.304	4.993
8	691.8	14880	47.80	0.315	5.063
9	616.7	12800	49.17	0.302	4.953
10	574.0	13100	44.62	0.294	4.963
11	584.1	13150	44.86	0.308	4.866
12	651.1	13480	48.77	0.295	5.104
13	578.6	12850	46.18	0.305	4.844
14	572.7	12650	45.88	0.298	4.916
15	629.2	13750	46.58	0.318	4.879
16	599.9	12800	47.54	0.316	4.835
17	587.3	13050	46.08	0.290	5.056
18	640.5	13700	47.62	0.323	5.008
19	658.3	13600	49.05	0.302	4.968
20	630.5	13100	48.36	0.312	5.003
21	639.8	13475	48.66	0.317	5.146
22	642.1	13425	48.29	0.323	5.040
23	601.9	12635	47.88	0.304	4.957
24	625.0	13200	48.36	0.327	5.067
25	570.8	12700	45.67	0.300	5.244
26	645.9	13450	48.57	0.300	4.988
27	621.3	13700	46.26	0.304	5.145
28	567.6	13200	43.62	0.314	4.906
29	574.1	13150	44.35	0.284	5.000
30	611.1	12550	49.15	0.312	4.936
31	577.1	13700	42.54	0.274	5.034

表 2 T800H/PMR-15 の引張試験結果

Number	Tensile strength	Failure strain	Elastic modulus	Poisson's ratio
No.	S_u (MPa)	ϵ_f (μ strain)	E (GPa)	ν
1	731.0	13890	53.81	0.306
2	833.6	14760	57.35	0.310
3	809.2	13900	58.96	0.314
4	767.5	14210	54.55	0.322
5	793.7	14920	54.02	0.303
6	841.3	16390	52.98	0.308
7	870.7	16340	54.37	0.295
8	728.6	14040	53.25	0.294
9	765.3	14220	54.45	0.290
10	742.3	14290	56.68	0.297
11	786.9	15130	53.44	0.294
12	764.2	14480	53.74	0.306
13	795.8	14040	57.11	0.298
14	837.4	14970	56.36	0.300
15	803.2	14460	55.71	0.296
16	835.4	15990	53.86	0.316
17	790.6	15740	54.81	0.314
18	720.8	14540	54.32	0.307
19	781.5	15850	54.06	0.324
20	770.7	15460	54.42	0.299
21	684.3	14250	52.40	0.296
22	855.4	16940	55.12	0.302
23	790.5	16720	51.59	0.300
24	842.5	17190	53.49	0.306
25	785.1	16280	52.63	0.297
26	819.3	16650	53.72	0.292
27	796.3	15810	54.95	0.300
28	758.2	15840	52.25	0.289
29	824.6	17100	52.63	0.306
30	770.7	15710	53.78	0.305

表 3 Celion 6K/PMR-15の引張機械的性質および試験片厚さの代表値, ばらつき, および B 許容値

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	47.82	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
2P-Weibull	B allowable	547.7	12270	43.32		
	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		

おける B 許容値を計算するための V 値¹⁸⁾は, $V_{0.1}(0.95) = 3.127$ ($n=30$), 3.111 ($n=31$)である。これらを用いて表 3.4 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が最も小さな値となり, 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, あまり大きな差は無い。

4.3 各特性の 4 種類の分布モデルに対する適合度評価

通常使用される適合度の検定方法としては, 定量的な方法と確率紙にデータをプロットして直感的に判断する方法がある。ここでは, 定量的な方法として前記した修正コロモゴロフ・スミルノフ適合度検定法を使用するとともに, 仮定した 4 種類の分布モデルに対する確率紙上にデータをプロットして目視により適合度を検討する。

表 4 T800H/PMR-15の引張機械的性質の代表値, ばらつき, および B 許容値

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	

表 5 Celion 6K/PMR-15 のデータに対する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定統計量の計算値

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

4.3.1 修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定

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る数値を導き, 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 の値を表5, 6に示す。これらの表において D_n 値の小さい方があてはまりが良いと判定する。表3と4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余り大きな差がないことがわかる。表5, 6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方があてはまりが良いことがわかる。分布形も標本毎にばらつくことを考えると, 以上の点から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方が取り扱いが容易である。

表 6 T800H/PMR-15 のデータに対する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定統計量の計算値

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

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²⁰⁾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。表5, 6を見ると棄却されるものが幾つか存在し, 数値に下線を引いて示した。

4.3.2 確率紙による方法

正規, 対数正規, 極値, およびワイブルの4種類の確率紙上に, 表1, 2のデータをメジアンランクを使用してプロットし図2~10に示す。なお, 各分布に対する近似直線はそれぞれの確率紙上で最小2乗法により導いたものである。確率紙上の確率の小さな範囲と大きな範囲では, 確率スケ

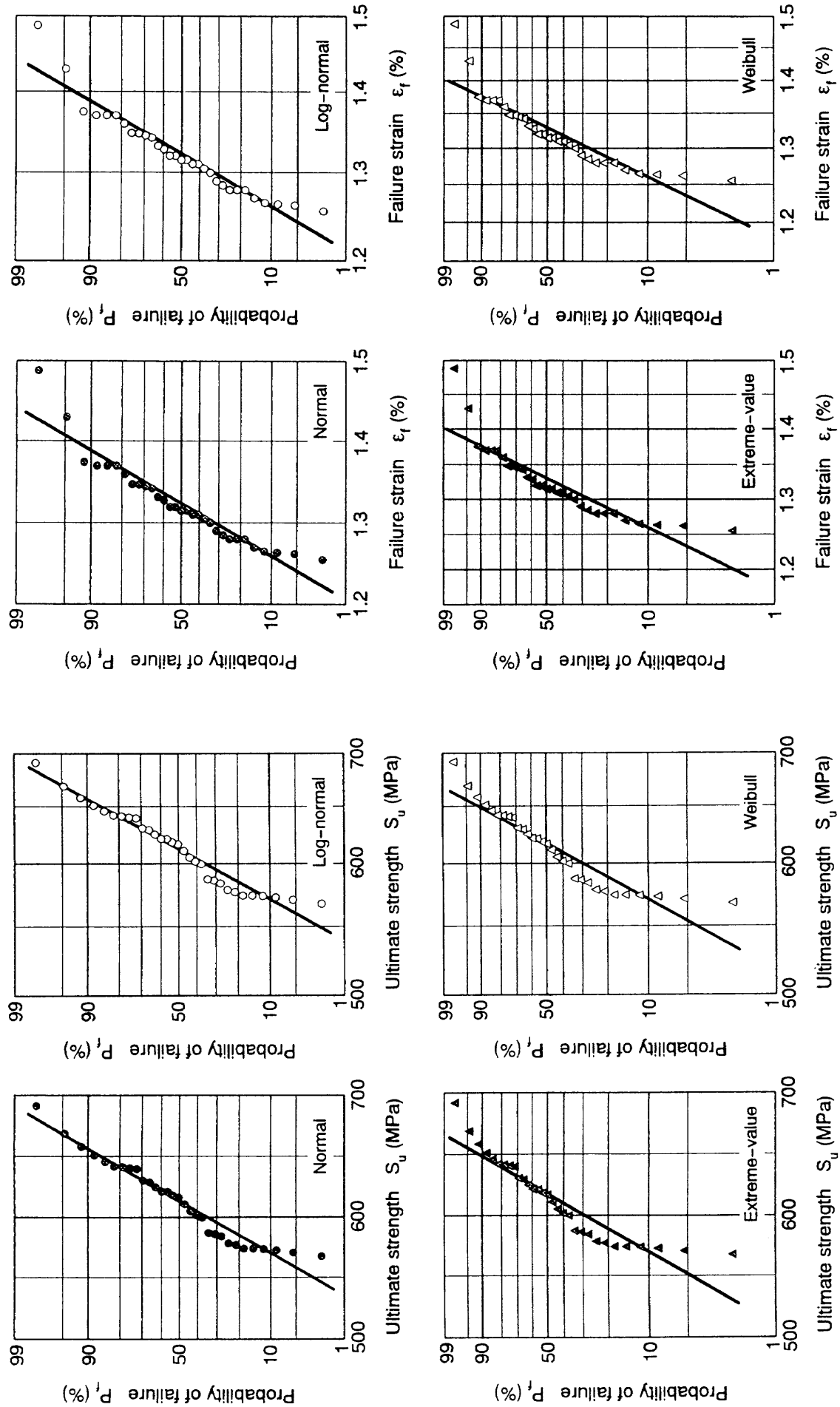


図3 4種類の確率紙上にプロットしたCelion 6K/PMR-15の破断歪分布

図2 4種類の確率紙上にプロットしたCelion 6K/PMR-15の引張強度分布

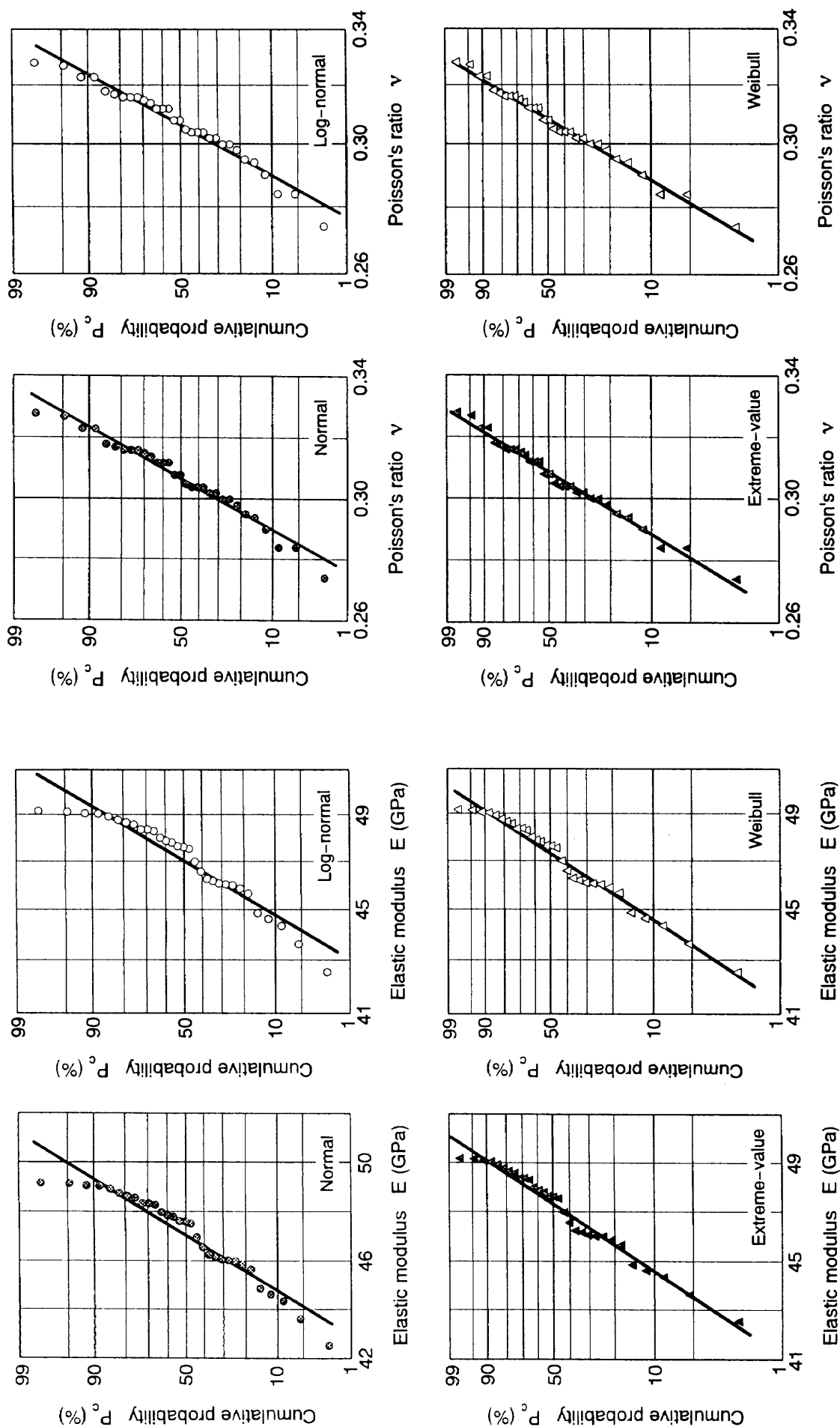


図4 4種類の確率紙上にプロットしたCelion 6K/PMR-15の弾性係数分布

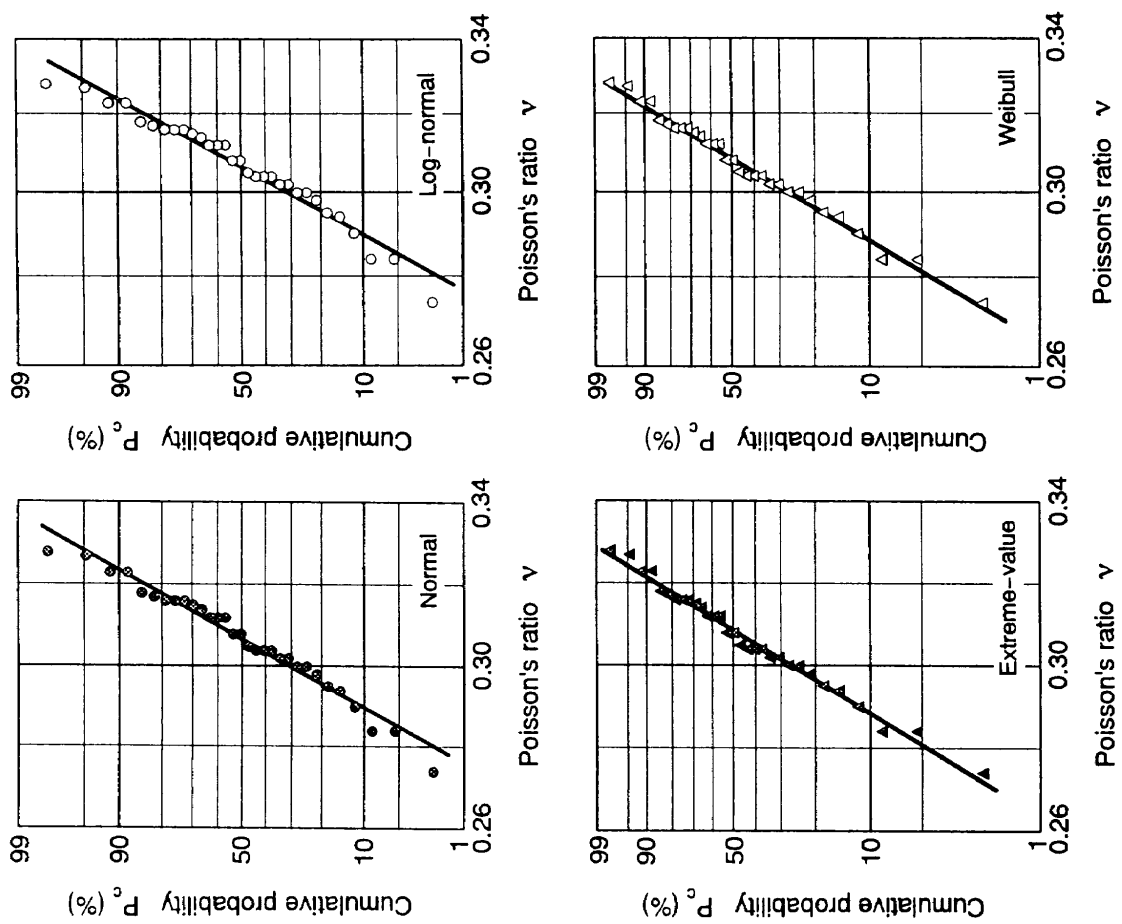


図5 4種類の確率紙上にプロットしたCelion 6K/PMR-15のポアソン比分布

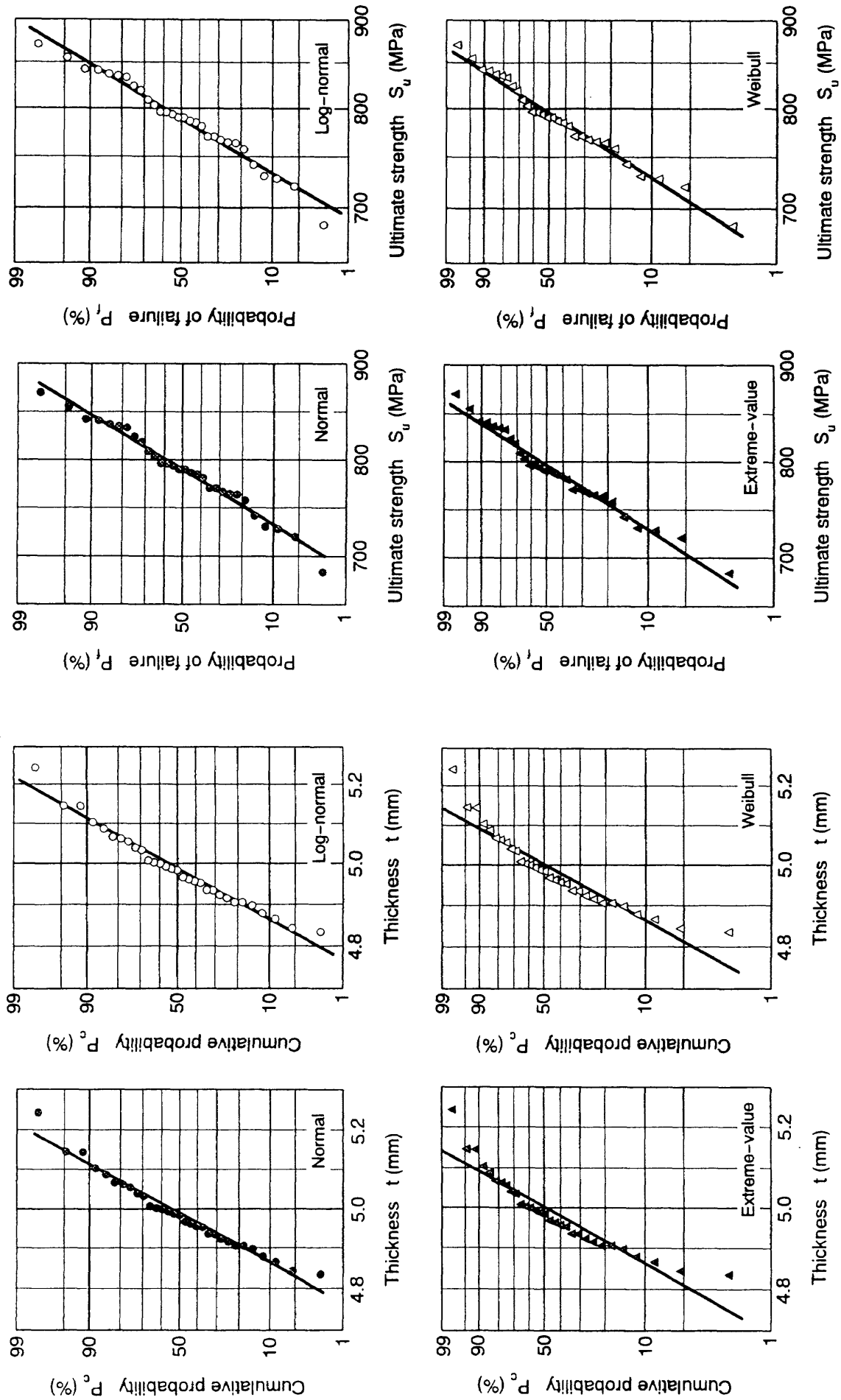


図6 4種類の確率紙上にプロットしたCelion 6K/PMR-15の試験片厚さ分布

図7 4種類の確率紙上にプロットしたT800H/PMR-15の引張強度分布

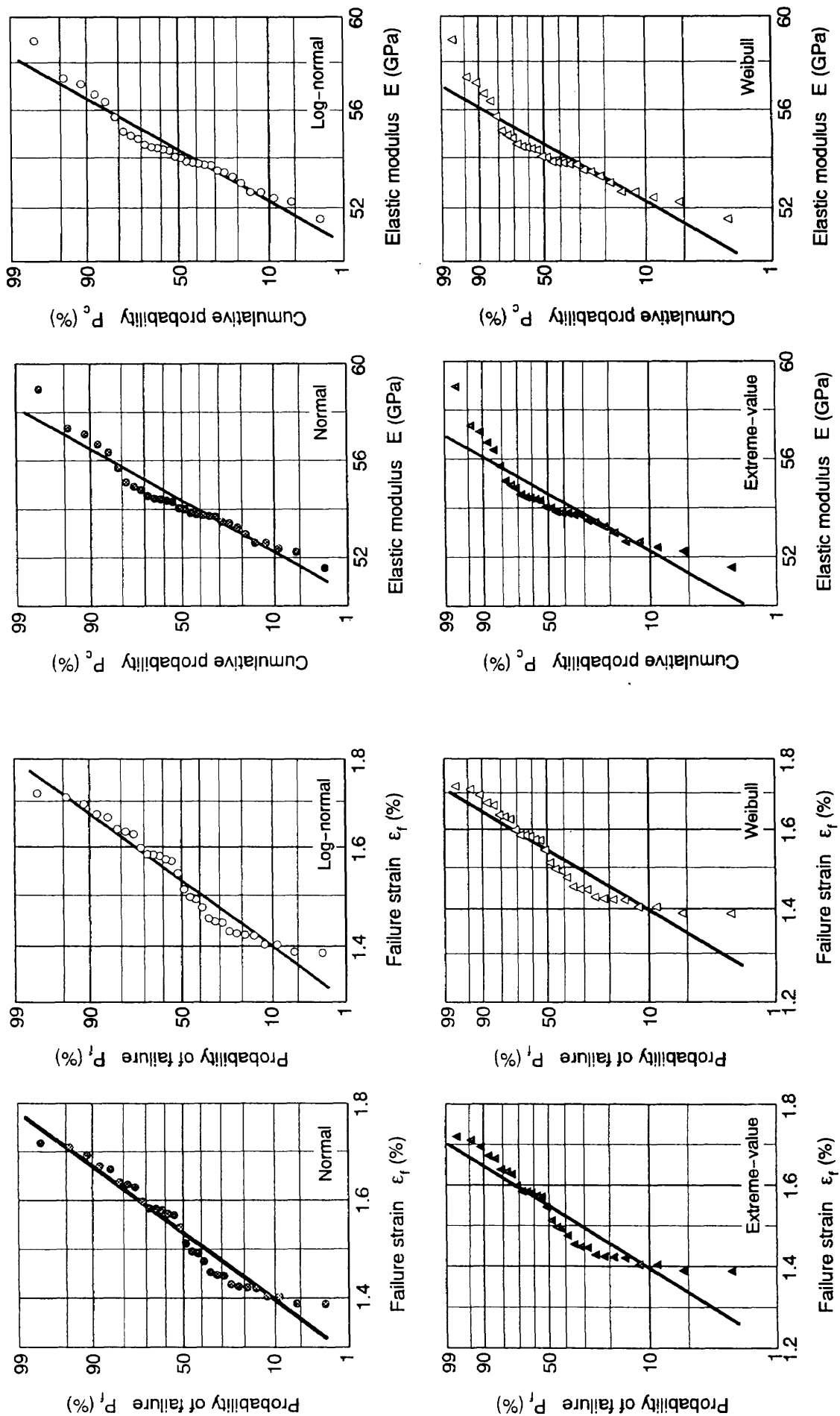


図 8 4 種類の確率紙上にプロットした T800H/PMR-15 の破断歪分布

図 9 4 種類の確率紙上にプロットした T800H/PMR-15 の弾性係数分布

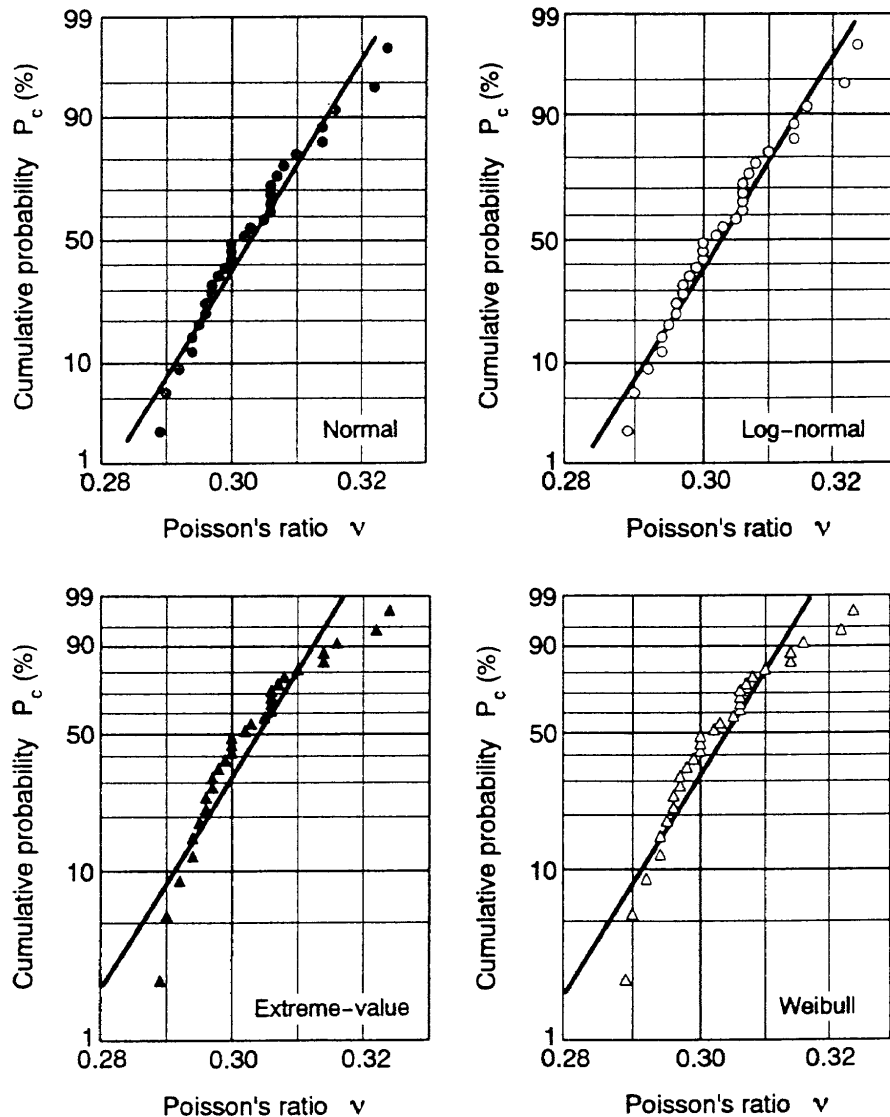


図10 4種類の確率紙上にプロットしたT800H/PMR-15のポアソン比分布

ールの相対的拡大率は大きくなっている。また、50%周りでは拡大率が小さい。このように確率スケールが非線形であるから、直感的判断の際には確率スケールの拡大率が大きい範囲では、想定する分布に敏感な判断となることに注意しなければならない。したがって、確率紙による判定は表5,6による修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定結果とは一致しない場合があっても不思議ではない。

まず、表5と6によっても明らかであったが、図2～10を見るといずれの機械的性質に対しても、正規系の正規分布と対数正規分布ではほとんど差がない結果である。一方、ワイブル系の極値分布と2母数ワイブル分布についても、同様に差の小さい結果であることがわかる。

確率紙上にプロットしたデータにより分布モデルへの適合度を直感的に判断すると、概ね表5,6の修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の統計量による結果と一致すると考えられる。ただし、図7のT800H/PMR-15の引張強度を見

ると、実用的観点から最弱値を重視して考えるなら、ワイブル系の分布の方があてはまりがよいということになる。もちろん、最弱値は標本毎に大きくばらつく性質があることを認識しておく必要がある。一方、表5で正規系の分布に適合度があまりよくなかったCelion 6K/PMR-15の弾性係数やポアソン比の場合は、図4,5で明らかのようにワイブル系の分布を使用すればかなりあてはまりのよい結果が得られることがわかる。

4.4 機械的性質間における相関関係の検討

各機械的性質間の関連を調べるために、相関係数を計算する。得られた相関係数行列を表7,8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、共通な傾向

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²¹⁾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図11, 12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、あまり強くない両者の相関を直感的に理解できる。

表7 Celion 6K/PMR-15のデータに対する
相関係数行列

	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

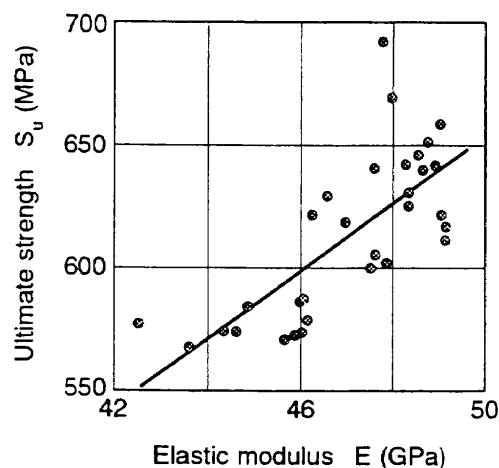
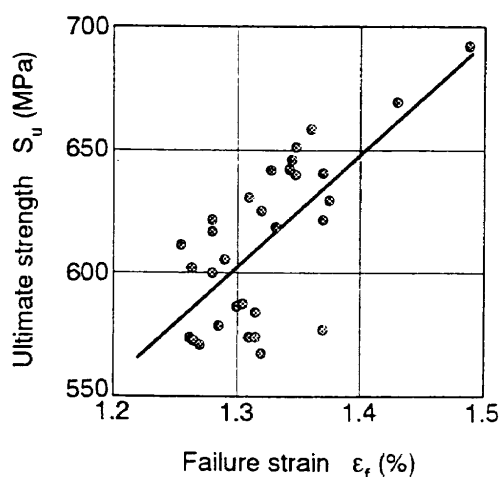


図11 Celion 6K/PMR-15における引張強度と破断歪，引張強度と弾性係数の相関関係

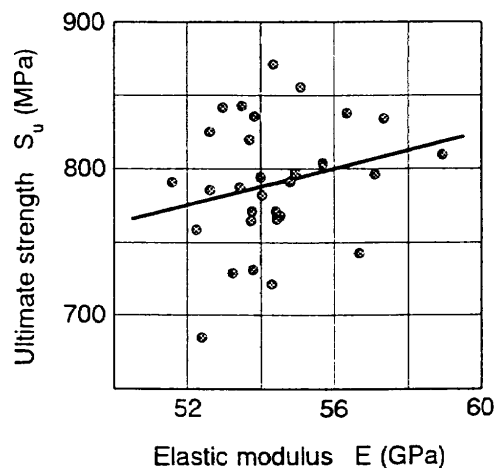
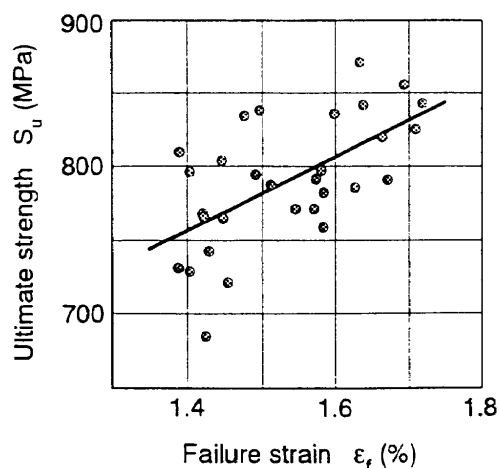


図12 T800H/PMR-15における引張強度と破断歪，引張強度と弾性係数の相関関係

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ことが判った。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 S_u を z ，破断歪 ϵ_f を x ，弾性

表8 T800H/PMR-15のデータに対する
相関係数行列

	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

係数 E 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て、 a , b_1 , b_2 を導き、表9に示した。また、図13(a)と(b)にはこれらの回帰式を使い、予測値と実験値の比較を示す。Celion 6K/PMR-15 の場合の重相関係数は0.995とほぼ1であり、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を意味する。これは図13(a)に示す通りである。またこの図を図11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判る。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表8の相関係数値に比べて大幅に改善されていることがわかる。これは図12と図13(b)を比較することによっても理解できる。

4.6 引張強度の簡易予測式

本研究で取り上げた複合材料の室温における応力-歪関係は破断に至るまで直線に近いから、引張強度 S_u は単純に弾性係数 E と破断歪 ϵ_f の積、

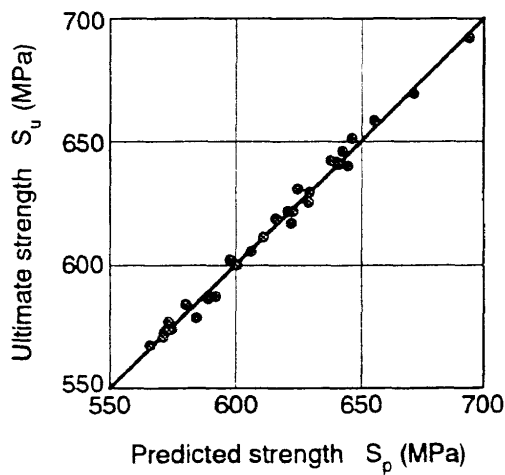
$$S_u = E \cdot \epsilon_f \quad (25)$$

としてもよい予測式が得られると推測される。そこで、図14(a), (b)に試験結果と式(25)による予測式を太い実線で

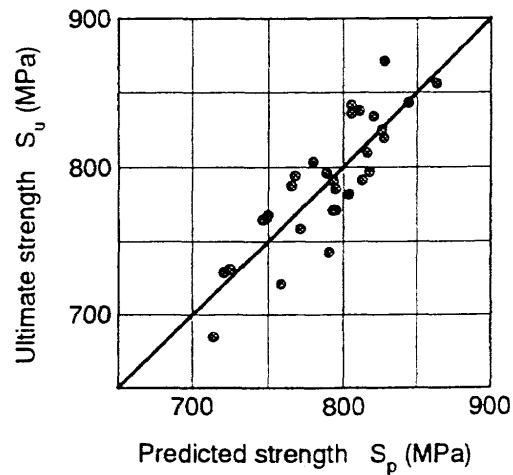
表9 重回帰分析の結果

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.

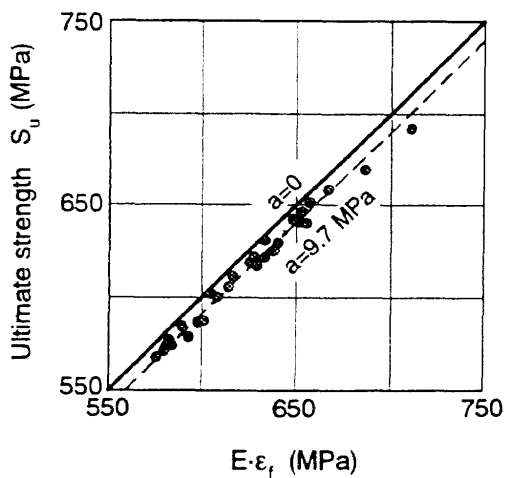


(a) Celion 6K/PMR-15

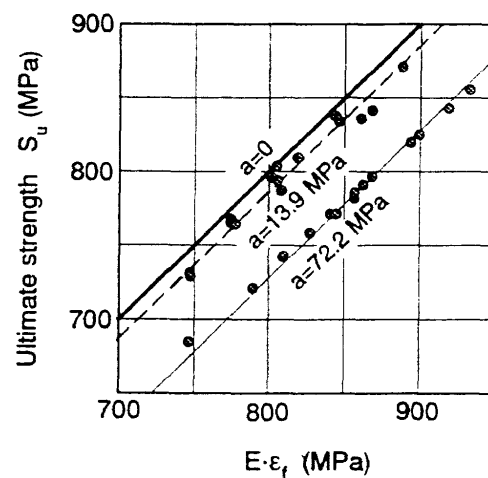


(b) T800H/PMR-15

図13 重回帰分析による引張強度の予測, (a) Celion 6K/PMR-15 の場合, (b) T800H/PMR-15 の場合



(a) Celion 6K/PMR-15



(b) T800H/PMR-15

図14 引張強度の簡易近似式による予測, (a) Celion 6K/PMR-15 の場合, (b) T800H/PMR-15 の場合

描いて示す。このままでは、図 13(a), (b) のほうがはるかに優れた近似である。しかしながら、Celion 6K/PMR-15 の場合は、太い実線をそのまま下にずらすことによりあてはまりのよい近似式が得られることがわかる。一方、T800H/PMR-15 の場合については、データが 2 つのグループに大きく別れているが、それぞれについて太い実線を下にずらすことにすれば、やはりあてはまりのよい予測式が得られることがわかる。

いま、下方に移動させる大きさを a とおくと、式(25)は

$$S_u = E \cdot \epsilon_f - a \quad (26)$$

のように変形される。この式はパラメータが 1 個であるので取り扱いが簡単である。すなわち、最小 2 乗法をあてはめて得られる a の値は、太い実線からの縦方向偏差の平均値に取ればよい。すなわち、Celion 6K/PMR-15 の場合は、 $a=9.7\text{MPa}$ と計算される。一方、T800H/PMR-15 の場合は、太い実線に近いグループと遠いグループに分けることにすると、それぞれ半数の 15 点ずつとなる。このような前提のもとで a を計算すると、 $a=13.9$ および 72.2MPa となる。これらの数値を使用して、簡易予測式を破線および細線により描き、図 14(a), (b) に示した。これらは試験結果によく一致していることが判る。残差の平方和により、Celion 6K/PMR-15 の簡易予測式を重回帰式による予測式と近似度を比較すると、約 1.5 倍であるからかなり近いことが判る。もちろん、重回帰分析による予測式は 3 個のパラメータ持っているので近似度がよいのは当然である。

ここで、 a が一定であるという意味を考えてみると、弾性係数と破断歪の組合せによらず、両者の積から一定値を差し引けば引張強度に一致するということになる。弾性係数の定義は、前記したように応力-歪線図において歪の大きさ 0.1% と 0.6% の間を線形であるとして計算している。しかしながら、応力-歪線図を全体的に詳細に見れば幾分上に凸の曲率がある。したがって、引張強度は弾性係数と破断歪の積よりは小さいことになる。ただし、 a が Celion 6K/PMR-15 の場合は一定であり、T800H/PMR-15 の場合は 2 つのグループに別れてそれぞれ一定であるという理由については明らかでない。

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列挙する。

(1) 引張強度、破断歪、および弾性係数の代表値については、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 の方が Celion 6K/PMR-15 の場合よりやや大きい、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、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無かった。

(3) 各性質の 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余り大きくなかった。

(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方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) 修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の統計量と確率紙上へのプロットによる判定は概ね一致した。ただし、T800H/PMR-15 の引張強度の場合だけは、実用的見地から最小値を重視すれば、修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の結果と確率紙上のプロットが与える結論では逆になると考えられた。

(6) 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。

(7) 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ほぼ 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によく一致した。

(8) 弾性係数と破断歪の積から一定値を割引くことにより、試験結果とよく一致する引張強度の簡易予測式が得られた。Celion 6K/PMR-15 の場合、この一定値は 9.7MPa である。ただし T800H/PMR-15 の場合は、半数ずつ 2 組のグループに分ける必要があり、これらの値は 13.9MPa と 72.2MPa と計算された。

本研究を遂行するに当たり、富士重工(株)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) Dexter, H.B., and Davis, J.G., Eds.: *Graphite/Polyimide Composites*, NASA CP 2079, 1979.
- 2) *High Temperature Polymer Matrix Composites*, NASA CP-2385, 1985.
- 3) Serafini, T.T., and Hanson, M.P.: "Environmental Effects on Graphite Fiber Reinforced PMR-15

- Polyimide," *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, Adsit, N.R., Ed., (1982), pp. 5-19.
- 4) Kunz, S.C., "Thermomechanical Characterization of Graphite/Polyimide Composites," *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, Adsit, N.R., Ed., (1982), pp. 33-53.
- 5) Garber, D.P., Morris, D.H., and Everett, R.A., Jr., "Elastic Properties and Fracture Behavior of Graphite/Polyimide Composites at Extreme Temperatures," *Composites for Extreme Environments*, ASTM STP 768, Adsit, N.R., Ed., (1982), pp. 73-91.
- 6) Nelson, J.B., "Thermal Aging of Graphite/Polyimide Composites," *Long-Term Behavior of Composites*, ASTM STP 813, O'Brien, T.K., Ed., American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 206-221.
- 7) McCleskey, S.F., Cushman, J.B., and Skoumal, D.E., "High Temperature Composites for Advanced Missile and Space Transportation Systems," AIAA Paper 82-0707, Proc. SDM. Conf., 1982, pp. 212-222.
- 8) Wilson, D.W., Pipes, R.B., Riegner, D., and Webster, J., "Mechanical Characterization of PMR-15 Graphite/Polyimide Bolted Joints," *Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites*, ASTM STP 734, Chamis, C.C., Ed., American Society for Testing and Materials, 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, 「カーボン/ポリイミド複合材料の基本特性試験」, 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・日本機械学会共催, 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, 「カーボン/ポリイミド複合材料の基本特性試験結果のばらつきについて」, 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・日本機械学会共催, 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, 「カーボン/ポリイミド積層板試験片の静引張多数本データに関する信頼性解析」, 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・日本機械学会共催, 1989, pp. 64-67.
- 12) 三本木茂夫, 「積層板の強度推定法の比較」, 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・日本機械学会共催, 1989, pp. 68-71.
- 13) 富岡史城, 夏村 匡, 「CF/PMR-15を用いた構造要素の強度評価に関する研究」, 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, 「材料強度設計許容値の統計的評価方法」, 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) 石川 浩, 鶴井 明, 下河利行, 「信頼性工学的データ処理方法-設計許容値を導く手順-」, 材料, Vol. 42, No. 477, 1993, pp. 715-719.
- 16) MIL-HDBK-5F, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*, Department of Defense, U.S.A., 1990.
- 17) 山内二郎他著, 統計数値表, JSA-1972, 日本規格協会, 1972.
- 18) 下河利行, 「数表による極値分布と2母数ワイブル分布の母数およびパーセント点の信頼限界値推定」, 材料, Vol. 41, No. 468, 1992, pp. 1446-1451.
- 19) Mann, N.R., Schafer, R.E., and Singpurwalla, N.D., *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*, John Wiley & Sons 1974, p. 349.
- 20) 下河利行, 「極値分布と2母数ワイブル分布に対する修正コルモゴロフ・スミルノフ適合度検定の限界値」, 材料, Vol. 39, No. 436, 1990, pp. 45-49.
- 21) 濱口泰正, 下河利行, 角田義秋, 「カーボン/ポリイミド積層材料平滑試験片圧縮強度の統計的分布」, 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・日本機械学会共催, 1992, pp. 286-289.

航空宇宙技術研究所報告1238号

平成6年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

Printed in Japan